



**Teknillinen korkeakoulu
Materiaali- ja kalliotekniikan osasto
Insinööргеологиян ja geofysiikan laboratorio**

MEREEN UPOTETTUJEN AMMUSTEN MAGNEETTINEN PAIKANNUS

Sonja Maria Voipio

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi diplomi-insinöörin tutkintoa varten Espoossa 18.7.2000

Työn valvoja

Professori Markku Peltoniemi

Työn ohjaaja

DI Maija Kurimo

Teknillinen korkeakoulu
Materiaali- ja kalliotekniikan
osaston kirjasto
PL 6200 (Vuorimiehentie 2)
02015 TKK

Tekijä:	Sonja Voipio
Työn nimi:	Mereen upotettujen ammusten magneettinen paikannus
Päivämäärä:	18.7.2000 Sivumäärä: 88
Osasto:	Prosessi- ja materiaalitekniikka
Koulutusohjelma:	Materiaali- ja kalliotekniikka
Professuuri:	Mak-33 Sovellettu geofysiikka
Työn valvoja:	Professori Markku Peltoniemi
Työn ohjaaja:	DI Maija Kurimo
<p>Toisen maailmansodan jälkeen Suomessa hävitettiin yleisesti vanhoja ammustarvikkeita mereen upottamalla. Tätä pidettiin tällöin turvallisimpana vaihtoehtona. Kokkolan uuden syväväylän ruoppaustöiden yhteydessä v. 1997 pohjasta nousi vanhoja kranaatteja. Puolustusvoimat ja Merenkululaitos valitsivat Geologian tutkimuskeskuksen (GTK) suorittamaan Kokkolan syväväylän magneettiset ammusten paikannusmittaukset kesällä 1999. Kyseessä on ensimmäinen suomalaisin voimin toteutettu projekti, jossa mereen upotettuja ammuksia paikannettiin magneettisilla menetelmillä.</p> <p>GTK:ssa suunniteltiin uusi ammustenpaikannusmenetelmä, joka perustuu Maan magneettikentän totaaliarvon mittaamiseen. GTK kartoitti magneettisilla mittausmenetelmillä kesän ja syksyn 1999 aikana 100 hehtaarin suuruisen alueen Kokkolan syväväylällä. Aikaa tutkimukseen kului kolme ja puoli kuukautta.</p> <p>Ammustutkimuksien hankalin ongelma on mittauksissa saatavien havaintojen suuri määrä. Magneettikentän muutoksen (anomalian) perusteella ei voida luotettavasti erotella ammuksia muista ferromagneettisista kohteista.</p> <p>Ammusten magneettinen anomalia riippuu havaintoetäisyydestä, ammuksen magneettisista ominaisuuksista sekä asennosta Maan magneettikenttään nähden. Magneettinen anomalia vaimenee erittäin voimakkaasti etäisyyden funktiona. Kranaateilla on eri suuruisia pysyviä magnetoitumia. Pysyvä magnetoituma voi pahimmassa tapauksessa kumota indusoituneen magnetoituman täysin, jolloin ammusta ei voida magnetometrillä havaita.</p> <p>Tässä diplomityössä perehdytään tarkemmin ammusten magneettimittauksiin, GTK:n kehittämään magneettiseen ammustenpaikannusmenetelmään, Kokkolan syväväylällä v. 1999 tehtyihin magneettisiin ammusmittauksiin sekä mittaustulosten tulkintaan</p> <p>Avainsanat: magneettiset menetelmät, totaalikenttä, indusoitunut ja remanentti magnetoituma, magneettinen anomalia, räjähtämätön ammussaaste</p>	

Author:	Sonja Voipio	
Title of thesis:	UnExploded Ordnance Detection by Marine Magnetometer	
Date:	18.7.2000	Number of pages: 88
Department:	Department of Materials Science and Rock Engineering	
Chair:	Mak-33 Applied Geophysics	
Supervisor:	Professor Markku Peltoniemi	
Instructor:	Maija Kurimo, M.Sc. (Tech.)	
<p>After the World War II it was considered to an acceptable and safe action to sink old ordnance material into the sea. Therefore old ordnance material was found when dredging the new fairway near the Kokkola harbour in the Gulf of Bothnia in 1997. In order to assure the dredging safety marine authorities ordered magnetic surveys from the Geological Survey of Finland (GTK). A new pilot project started in 1998 and the field surveys were completed before the end of 1999.</p> <p>A new marine measurement system with four total field cesium magnetometers was constructed at GTK. The surveys conducted at the fairway successfully located significant amount of the buried ordnance. GTK measured 100 hectares of sea bottom during the survey.</p> <p>Discrimination between true ordnance material and harmless ferromagnetic objects is acute but yet unsolved problem in the ordnance detection. Magnetic methods detect all ferromagnetic objects.</p> <p>Magnetic anomaly of ordnance items is very complex. It depends on the observation distance, magnetic properties of the target and the orientation in relation to the Earth's magnetic field. Magnetic anomaly falls off as $1/r^3$ so distance is very critical to the detection of the ordnance. Ordnance items may have remanent magnetization of different magnitudes. This may compensate induced magnetization partially or even totally.</p> <p>Magnetic ordnance surveys, GTK's survey configuration and data processing as well as terrestrial and marine reference measurements are discussed in this Master's Thesis.</p>		
Keywords: magnetic methods, total field, induced and remanent magnetization, magnetic anomaly, UXO		

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Geologian tutkimuskeskuksen Merigeologian ryhmässä. Suurenmoiset kiitokset ansaitsee diplomityön ohjaajaani, Teknillisen korkeakoulun sovelletun geofysiikan professori Markku Peltoniemi. Hänen kannustuksellaan olen saanut suuntautua syventävissä opinnoissani minulle läheiseen aiheeseen, merigeofysiikkaan. Haluan kiittää myös diplomityön valvojaani DI Maija Kurimoa Geologian tutkimuskeskuksesta kaikesta opastuksesta ja tuesta työni aikana. DI Kurimon apu osoittautui korvaamattomaksi niin projektiin liittyvissä alkuvaiheen käytännön ongelmissa kuin geofysikaalisten mittaustulosten tulkinnassa.

TkL Ari Poikonen Merivoimien Tutkimuslaitokselta sekä FL Risto Puranen Geologian tutkimuskeskuksen Tutkimus ja kehitys -osastolta ovat auttaneet minua diplomityön matemaattisen osuuden hahmottamisessa ja haluan ilmaista heille siitä lämpimät kiitokseni. Haluan kiittää myös kaikkia Geologian tutkimuskeskuksen Etelä-Suomen aluetoimiston sekä Tutkimus ja kehitys -osaston työtovereitani, joiden kanssa vietimme monia ikimuistoisia hetkiä Kokkolassa ammusmittausten parissa kesällä 1999.

Vanhoja ammustarvikkeita koskevasta asiantuntija-avusta haluan kiittää komkapt Hannu Maunulaa ja teknkaptl Pentti Holmaa Vaasan Sotilasläänin Esikunnasta sekä teknkapt Jaakko Laitilaa Ilmasotakoulusta. Kiitokset myös inskaptl Risto Hellgrenille ja DI Pertti Krupskoffille Merivoimien Tutkimuslaitokselta heidän kommentistaan ja neuvoistaan magneettisten mittausten osalta. Käytännön testimittausten avustamisesta sekä asioihin perehdyttämisestä ansaitsevat kiitokset Saaristomeren Meripuolustusalueen raivaajasukeltajat ltn Mika Lahtinen, ylil Paavo Lammes ja ylil Juha Seppänen. Ltn Lahtista haluan kiittää erityisesti hänen ottamistaan hienoista

vedenalaisista valokuvista, joita sain käyttöni. Kiitos myös Elesco Oy:n työntekijöille heidän avustaan tämän diplomityön valmistumisessa.

Pikkuserkulleni Ville Voipiolle osoitan suuret kiitokset hänen avustaan. Lisäksi haluan kiittää vanhempiani sekä sisartani Elinaa heidän tuestaan koko opiskeluaikanani. Ystäväni Anders ja Mari ansaitsevat myös kiitokset.

Espoossa 18. Heinäkuuta 2000


Sonja Voipio

SISÄLLYSLUETTELO

SISÄLLYSLUETTELO	1
KÄYTETYT LYHENTEET JA SUUREET	4
1. JOHDANTO	6
2. KATSAUS ERI MENETELMIIN	8
2.1 MAGNEETTISET MENETELMÄT	8
2.1.1 Maan magneettikenttä	9
2.1.2 Totaalikenttämittaus	12
2.1.3 Gradienttimittaus	13
2.1.4 Totaalikenttä- ja gradienttimittausten vertailu	15
2.1.5 Cesiumhöyrymagnetometri	15
2.2 SÄHKÖMAGNEETTISET MENETELMÄT	18
2.2.1 Taajuusalueen sähkömagneettinen mittaus eli pienoisslingram	19
2.2.2 Aika-alueen sähkömagneettinen menetelmä	21
2.2.3 Maatutka	22
2.3 JÄRJESTELMÄN VALINTA	24
3. ETSITTÄVIEN KOHTEIDEN FYSIKAALISET OMINAISUUDET	25
3.1 MATERIAALIT, MUOTO JA DIMENSIOT	25
3.2 MAGNEETTISET OMINAISUUDET	28
3.2.1 Suskeptibiliteetti	28
3.2.2 Demagnetoituma	29
3.2.3 Pysyvä magnetoituma	29
3.2.4 Pysyvän magnetoituman määrittäminen mittauksilla	30

3.3	MAGNEETTISEN DIPOLIN ANOMALIA	32
3.3.1	<i>Kentän vaimeneminen etäisyyden funktiona</i>	34
3.3.2	<i>Anomalian laskennallinen mallinnus</i>	36
4.	ETSITTÄVIEN KOHTEIDEN ANOMALIAT	40
4.1	LASKENNALLISESTI MÄÄRITETYT ANOMALIAT	40
4.2	TESTIMITTAUKSET KUIVALLA MAALLA	44
4.3	POHDINNAT	47
5.	KÄYTÄNNÖN MITTAUKSET	49
5.1	LÄHTÖKOHDAT	49
5.2	TYÖN TURVALLISUUS	50
5.3	MITTAUSJÄRJESTELMÄ	51
5.3.1	<i>GTK:n mittauslautta</i>	53
5.3.2	<i>Merenkulkupiirin haralautta</i>	54
5.3.3	<i>Mittaussysteemien vertailu</i>	56
5.4	AJOLINJAOHJELMISTO	59
5.5	MAGNEETTISIA MITTAUKSIA TUKEVAT MUUT MENETELMÄT	61
5.5.1	<i>Pinger-tutkimuskaikuluotain</i>	61
5.5.2	<i>Viistokaikuluotain</i>	61
5.5.3	<i>Sukellustutkimukset</i>	62
6.	GEOsoft UX-DETECT -OHJELMA	63
6.1	ANALYYTTINEN SIGNAALI	63
6.2	BLAKELYN ALGORITMI	65
6.3	EULERIN DEKONVOLUUTIO	66
7.	TULOSKÄSITTELY JA TULKINTA	68
7.1	ALKUKÄSITTELY	68
7.2	JATKOKÄSITTELY JA TULKINTA	69
7.3	TULKINNAN ONGELMAT	72
7.3.1	<i>Anomalian vaimeneminen etäisyyden funktiona</i>	72
7.3.2	<i>Uusintamittaukset</i>	73

7.3.3	<i>Kallioperän vaikutus</i>	74
7.3.4	<i>Kohteiden poiminta profiileilta</i>	74
7.4	MITTAUSTULOKSET	75
7.4.1	<i>152 mm kranaatti</i>	75
7.4.2	<i>500 kg lentopommi</i>	79
8.	JATKOTUTKIMUSEHDOTUKSET	82
9.	YHTEENVETO	84
	LÄHDELUETTELO	86

KÄYTETYT LYHENTEET JA SUUREET

DGPS	Differential Global Positioning System
FD	Frequency Domain
GLONASS	Globalnaja Navigatsionnaja Sputnikovaja Sistema
GTK	Geologian tutkimuskeskus
KKJ	Kartastokoordinaattijärjestelmä
MDCS	Marine Data Collection Software
RTK	Real Time Kinematic
T/A	Tutkimusalue
TD	Time Domain
UXO	Unexploded Ordnance
WGS84	World Geodetic System 1984

σ	johtavuus
μ	magneettinen permeabiliteetti
κ	todellinen susceptibiliteetti
μ_0	tyhjiön permeabiliteetti
$\Delta B_h, \Delta B_z, \Delta B_x, \Delta B_y$	Maan totaalikentän komponenttien anomaliaosat
γ_e	elektronin gyromagneettinen suhde
κ_e	näennäinen eli tehollinen susceptibiliteetti
μ_r	suhteellinen magneettinen permeabiliteetti
$A(x,y)$	analyttinen signaali kohdassa (x,y)
B_0	Ulkoinen Maan magneettikenttä
B_h, B_z, B_x, B_y	Maan totaalikentän eri komponentit
B_t	Maan magneettivuon tiheyden totaalikenttä
D	Maan magneettikentän deklinaatiokulma
f	Larmor-taajuus

H	Maan kentän voimakkuuden totaalikomponentti
$H_{demagn.}$	kappaleen demagnetoiva kenttä
H_{sis}	kappaleen sisällä vaikuttava magneettikenttä
I	Maan magneettikentän inkliinaatiokulma
m	magneettinen momentti
M_i	indusoitunut magnetoituma
$m_n.$	normalisoitu magneettinen momentti
$M_r.$	pysyvä eli remanentti magnetoituma
n	rakenneindeksi
N_i	demagnetoitumakerroin suunnassa i
Q	Q-suhde eli indusoituneen ja pysyvän magnetoituman suhde
r	etäisyys
V	kappaleen tilavuus
W	kompleksinen vastefunktio

1. JOHDANTO

Toisen maailmansodan jälkeen vuosina 1946 – 1974 Suomessa on hävitetty vanhoja ammustarvikkeita yleisesti mereen upottamalla. Vuosina 1946 – 1961 päätökset ammusupotuksista tehtiin paikallisella tasolla. Sotien jälkeen oli kiire päästä eroon suurista ammustarvikemääristä ja mereen upottamista pidettiin täysin hyväksyttynä vaihtoehtona. Vuosina 1961 – 1974 ympäristöministeriö ei sallinut ammustarvikkeiden räjäyttämistä ja niiden purkaminen olisi ollut liian riskialtista. Kokkolassa ammusupotukset suuntautuivat tällöin ulkomerelle vajaan 100 metrin syvänteessä sijaitsevaan viralliseen upotuspaikkaan. Itämeren komissio kielsi ammustarvikkeiden upotuksen mereen vuonna 1974.

Kokkolan uuden syväväylän ruoppaustöiden yhteydessä v. 1997 pohjasta nousi vanhoja kranaatteja. Ruoppaus keskeytettiin ja paikalle tilattiin saksalainen ammusten magneettimittauksiin erikoistunut ryhmä. Satama-alueella tehdyissä mittauksissa saatiin runsaasti havaintoja ferromagneettisista kohteista. Näiden mahdollisten ammusten ruoppaamiseen suunniteltiin uudentyyppinen kauko-ohjauksella toimiva ruoppaaja. Puhtaiksi merkittyjen alueiden ruoppaamista jatkettiin miehitetyllä ruoppaajalla.

Geologian tutkimuskeskus (GTK) aloitti kranaattien magnetometrimittauslaitteiston alustavan suunnittelun ja teki muutamia testimittauksia kesällä 1998. Varsinainen suunnittelutyö käynnistyi alkukevästä 1999, jolloin Puolustusvoimat ja Merenkululaitos valitsivat GTK:n suorittamaan Kokkolan syväväylän magnetometrimittaukset kesällä 1999.

Ammustutkimuksien hankalin ongelma on mittauksissa saatavien havaintojen suuri määrä. Magneettikentän muutoksen – anomalian – perusteella ei voida luotettavasti erottaa ammuksia muista ferromagneettisista kohteista. Paikoin jopa 85 – 95 % havainnoista aiheutuu vaarattomista metallikappaleista (Bell 1997).

Tässä diplomityössä perehdytään tarkemmin ammusten magneettimittauksiin, GTK:n kehittämään magneettiseen ammustenpaikannusmenetelmään, Kokkolan syväväylällä v. 1999 tehtyihin magneettisiin ammusmittauksiin sekä näiden mittausten tulosten tulkintaan.

2. KATSAUS ERI MENETELMIIN

Magneettiset ja sähkömagneettiset menetelmät ovat tällä hetkellä tehokkaimpia geofysikaalisia ammustenpaikannusmenetelmiä. Magneettisilla menetelmillä paikannetaan yleensä ferromagneettisia kohteita, kuten rautatynnyreitä ja -putkia. Sähkömagneettisilla menetelmillä havaitaan sähköä johtavat kappaleet eli myös epämagneettiset metallit kuten alumiini, messinki ja kupari (Spurgeon et al. 1998).

Magneettisessa menetelmässä lähdedipolin voimakkuus pienenee etäisyyden kuutiossa, sähkömagneettisessa etäisyyden kuudennessa potenssissa. Passiivisella magneettisella menetelmällä mitataan magnetoituvan esineen aiheuttamaa paikallista muutosta Maan magneettikentässä. Magneettinen anomalia on riippumaton anturin parametreista. Menetelmän herkkyys riippuu käytettyjen anturien herkkyydestä. Sähkömagneettinen menetelmä on aktiivinen menetelmä. Siinä herätesignaali synnytetään mittalaitteen heräteklassa, jolloin menetelmän syvyysulottuvuutta voidaan kasvattaa herätettä voimistamalla.

Seuraavassa käsitellään lyhyesti magneettisten ja sähkömagneettisten menetelmien periaatteet ammustutkimusten kannalta.

2.1 MAGNEETTISET MENETELMÄT

Magneettisilla menetelmillä mitataan ferromagneettisen kappaleen aiheuttamaa poikkeamaa Maan magneettikentässä. Tästä kentän poikkeamasta käytetään nimitystä anomalia tai heräte. Kyseessä on passiivinen tutkimusmenetelmä, jolla mitataan luonnollista suuretta eli Maan magneettikenttää ja siinä havaittavia muutoksia. Kohteen sijainnin, hautautumissyvyyden ja koon määrittäminen

tapahtuu tarkastelemalla anomalian muotoa ja amplitudia. Käytännössä ammuksia mallinnetaan yksinkertaisella magneettisella dipolimallilla. Indusoituvan dipolimomentin suuruuteen vaikuttavat kappaleen magneettiset ominaisuudet, massa, muoto ja asento Maan magneettikenttään nähden sekä pysyvän magnetoituman suuruus. Asento vaikuttaa myös mallin antamaan sijainti- sekä syyvyysarvioon. Luotettavin magneettinen mittaustulos saadaan alueella, jossa Maan taustakenttä on tasainen ja muita häiritseviä ferromagneettisia kappaleita on vähän.

2.1.1 MAAN MAGNEETTIKENTTÄ

Maan ympärilleen aiheuttama magneettikenttä on esitetty kuvassa 1. Maan magneettikenttää voidaan mallintaa keskeisdipolilla. Maantieteelliset ja magneettiset navat eivät sijaitse samoissa pisteissä. Magneettinen pohjoisnapa sijaitsee Kanadan arktisilla alueilla ja etelänapa Australian ja Antarktiksien välillä. Geomagneettisen kentän komponentit käyvät ilmi kuvasta 2. Maan magneettikentän voimakkuus vaihtelee magneettisten napa-alueiden 70 000 nT ja magneettisen päiväntasaajan 25 000 nT välillä (kuva 3). Suomen alueella Maan magneettikenttä vaihtelee n. 50 200 – 52 600 nT. Parasniksen mukaan komponentit ilmaistaan SI-järjestelmässä seuraavasti (Peltoniemi 1998)

B_t = Maan magneettivuon tiheyden totaalikenttä (nT)

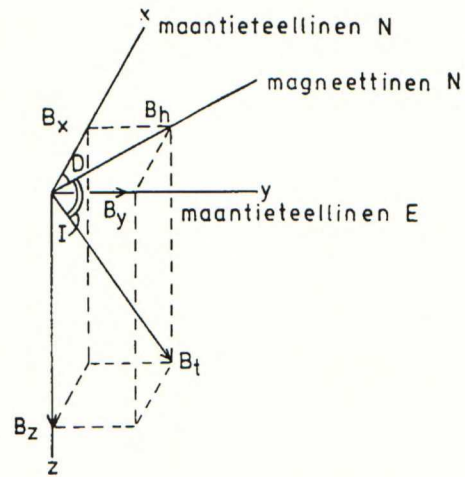
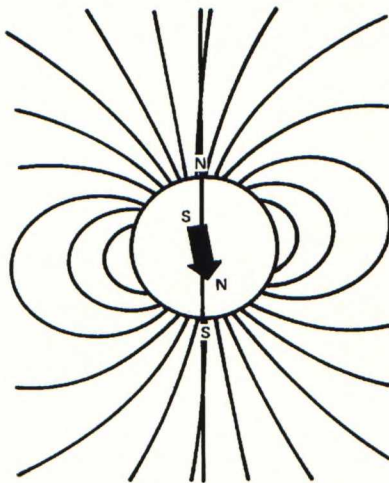
B_h, B_z, B_x, B_y = Maan totaalikentän eri komponentit

$\Delta B_h, \Delta B_z, \Delta B_x, \Delta B_y$ = vastaavat totaalikentän anomaliaosat

H = Maan kentän voimakkuuden totaalikomponentti (A/m)

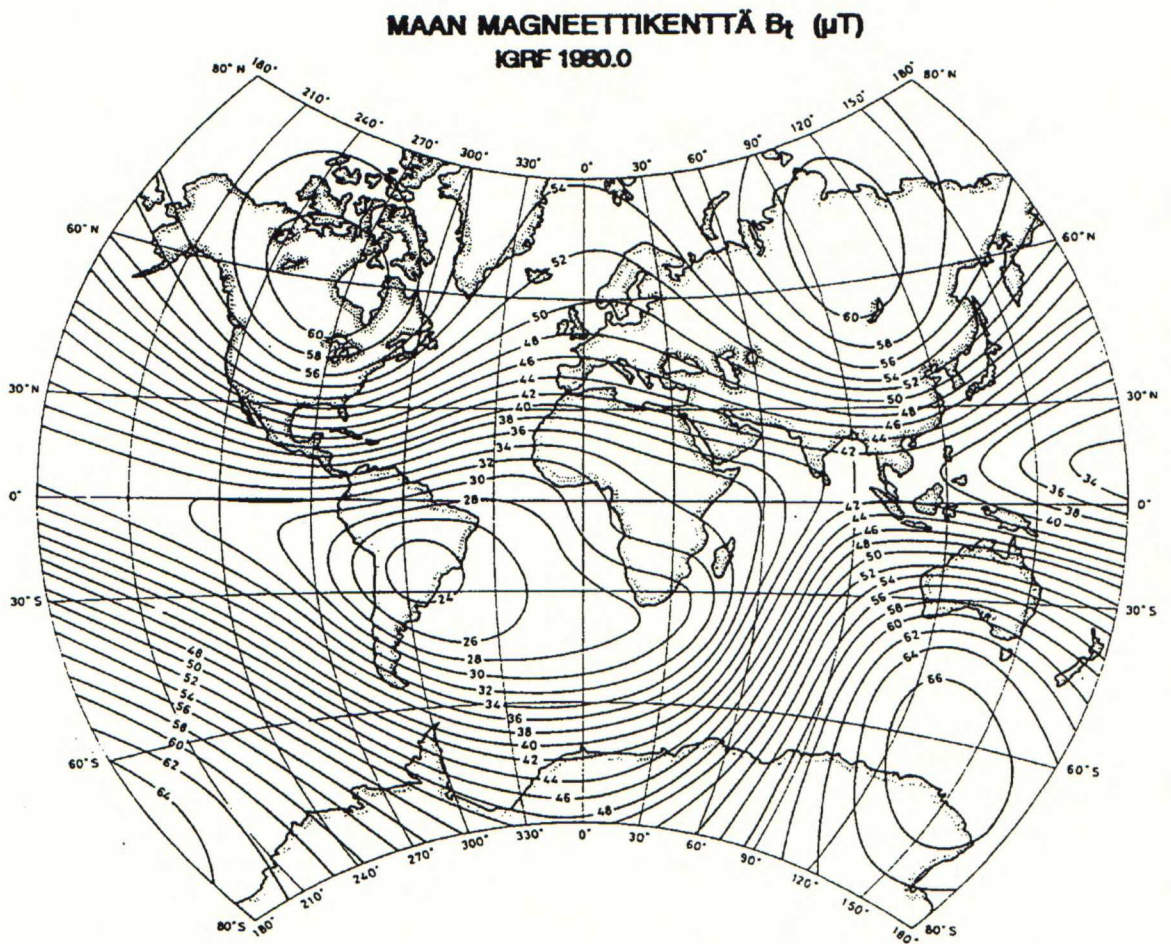
D = Deklinaatiokulma

I = Inklinaatiokulma



Kuva 1. Planeetta Maan magneettikenttä (Breiner 1973).

Kuva 2. Geomagneettisen kentän komponentit (Peltoniemi 1988).



Kuva 3. Maapallon magneettinen normaalikenttä (μT) (Nevanlinna et al. 1983).

Maan geomagneettisen kentän synnyttävää neljä eri lähdettä. *Sisäinen eli pääkenttä* aiheutuu Maan ytimen sähkövirroista. Sisäinen kenttä muuttuu hitaasti ajan mukana ja sen osuus koko kentästä on 99,9 %. *Ulkoinen kenttä* aiheutuu muiden taivaankappaleiden, pääasiassa auringon, vuorovaikutuksesta Maan kentän kanssa. Ulkoinen kenttä vaihtelee eri jaksoissa (1 Hz – 11 v) ja sen osuus koko kentästä on noin 0,1 %. Pääkentän *paikalliset poikkeamat* aiheutuvat Maan kuorikerroksen pintaosien magneettisten ominaisuuksien – indusoitu ja remanentti magnetoituma – vaihteluista. Paikalliset poikkeamat ovat ajallisesti ja paikallisesti vakioita, mutta sisäisen ja ulkoisen kentän vaihtelut voivat muuttaa indusoitunutta magnetoitumaa. Maan kuorikerroksen paikallisten geologisten vaihteluiden osuus magneettikentästä on noin 0,01 %. Sisäisen ja ulkoisen kentän Maahan aiheuttama *sähkömagneettinen induktio* synnyttää pyörrevirtoja, joihin liittyy magneettikenttiä.

Auringon sähkömagneettinen säteily ja hiukkassäteily aiheuttavat Maan kentässä ajallisesti nopeita vaihteluita, mm. säännöllisiä vuorokausivaihteluita sekä voimakkaita magneettisia myrskyjä. Magneettisten myrskyjen yhteydessä auringon aktiivisuus, ns. aurinkotuuli, voimistuu. Auringosta sinkoavat sähkömagneettiset hiukkaset syöksyvät Maan ilmakehään ja törmaävät ilman atomeihin. Tällöin syntyy revontulia, voimakkaita sähkövirtoja ionosfääriin sekä Maan pinnalla havaittavia magneettisiä häiriöitä. Kuvassa 4 on esitetty Maan magneettikentän ajallinen vaihtelu Kokkolassa 12.9.1999 10 tunnin aikana.

Ammusmittausten kannalta oleellisia ovat pääkentän paikalliset poikkeamat. Maan magneettikentässä havaittava paikallinen poikkeama eli anomalia aiheutuu jostakin ferromagneettisesta kappaleesta tai maankamaran magneettisten ominaisuuksien vaihtelusta. Suomessa magneettinen totaalikenttä on luokkaa 50 000 nT. Geologiset anomaliat vaihtelevat 1 – 10 000 nT välillä. Ammusten aiheuttamat anomaliat ovat suuruudeltaan 1 – 100 nT.



Kuva 4. Maan magneettikentän ajallinen vaihtelu Kokkolassa 12.9.1999 klo 8:00-18:00.

2.1.2 TOTAALIKENTTÄMITTAUS

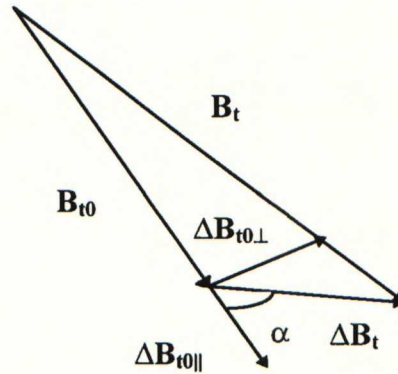
Totaalikenttämittauksissa mitataan magneettikentän itseisarvoa. Totaalikenttä B_t muodostuu Maan magneettikentän B_{t0} sekä kohteen aiheuttaman anomaliakentän ΔB_t vektorisummasta (kuva 5). Totaalikenttää mittaavat magnetometrit mittaavat ainoastaan tämän vektorisumman itseisarvoa, jolloin kohteen aiheuttaman kentän suunta jää tuntemattomaksi. Vektorisumman itseisarvolle saadaan johdettua kaava 2 seuraavasti

$$\overline{B}_t = \overline{B}_{t0} + \Delta \overline{B}_t \quad (1)$$

jos $\Delta B_t \ll B_t$, saadaan

$$B_t = B_{t0} + \frac{\Delta \overline{B}_t \cdot \Delta \overline{B}_{t0}}{B_{t0}} = B_{t0} + \Delta B_t \cos \alpha \quad (2)$$

missä α on ulkoisen totaalikenttävektorin B_{t0} ja totaalianomaliavektorin ΔB_t välinen kulma. Anomaliavektori ΔB_t voidaan jakaa komponentteihin Maan kentän suuntaiseen $\Delta B_{t\parallel}$ sekä Maan kenttää vasten kohtisuoraan $\Delta B_{t\perp}$ osaan (kuva 5). Anomaliavektorista ΔB_t tulee totaalikenttämittauksissa huomioiduksi vain Maan kentän suuntainen osa $\Delta B_{t\parallel}$.



Kuva 5. Totaalikenttämittauksissa anomaliavektorista ΔB_t huomioidaan vain Maan kentän suuntainen osa $\Delta B_{t\parallel}$.

Maan totaalikenttää mitattaessa havainnoissa ovat mukana niin syvältä kallioperästä tulevat pitkäaaltoiset (paikan mukaan hitaasti muuttuvat) anomaliat kuin lähellä pintaa sijaitsevista lähteistä aiheutuvat lyhytaaltoiset (korkeataajuiset) kentänmuutokset. Ammustutkimuksissa keskitytään vain maan pintakerrosten korkeataajuisiin anomaliaoihin, jotka saadaan esille suodattamalla mittaustuloksista pois matalataajuisen geologinen osa. Totaalikenttämittauksissa tarvitaan magneettista referenssiasemaa eli maa-asemaa, jotta Maan magneettikentän ajalliset muutokset (käynti) saadaan poistettua mittaustuloksista. Maa-aseman avulla voidaan myös välttää mittaukset magneettisten myrskyjen aikana.

Totaalikentän mittaamiseen perustuvissa ammustutkimuksissa käytetään cesiumhöyrymagnetometriä, josta käytetään myös nimitystä absorptiomagnetometri tai optisen pumppauksen magnetometri. Laitteella saavutettava herkkyys on luokkaa $\pm 0,01$ nT (Peltoniemi 1998). Suunnatulla fluxgate -magnetometrillä saadaan puolestaan mitattua totaalikentän eri komponentteja tarkkuudella $\pm 1 \dots 5$ nT (Parasnis 1997).

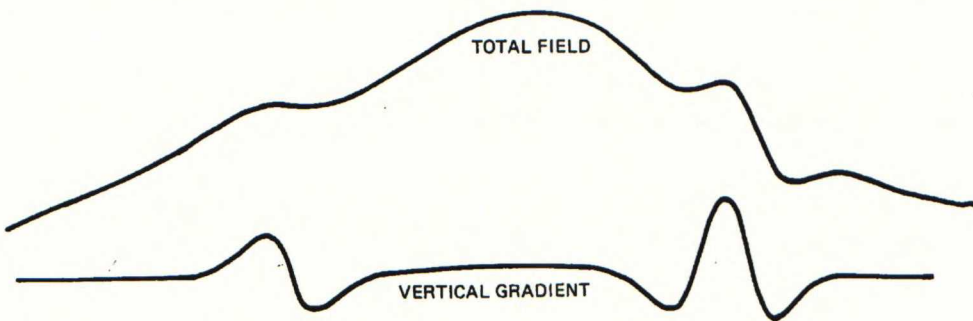
2.1.3 GRADIENTTIMITTAUS

Magneettikentän gradientilla dB/dr tarkoitetaan kentän muuttumista paikan suhteen. Käytännössä gradienttia mitataan yleensä kahdella anturilla, jotka on asennettu kiinteästi tietyn etäisyyden päähän toisistaan. Anturien keskinäisen

etäisyyden tulee olla pienempi kuin etäisyyden tutkituihin kohteisiin. Mitattu gradientti sijoittuu anturien etäisyysvektorin keskipisteeseen. Menetelmä toimii, jos kenttä muuttuu tasaisesti mittauspisteiden välillä. Laskennallisen gradientin (dB/dr) ja mitatun gradientin ($\Delta B/\Delta r$) välinen relaatio voidaan esittää seuraavasti

$$\frac{dB}{dr} = \lim_{\Delta r \rightarrow 0} \frac{B(r) - B(r + \Delta r)}{\Delta r} \approx \frac{B(r) - B(r + \Delta r)}{\Delta r} = \frac{\Delta B}{\Delta r} \quad (3)$$

missä dB/dr on totaalikentän B muutosnopeus suunnassa r , $\Delta B = B(r) - B(r + \Delta r)$ totaalikentän erotus kahden anturin välillä ja Δr anturien välinen etäisyys. Gradientti ilmoittaa Maan magneettikentän muutoksen pituusyksikköä kohden, joten yksikkö on nT/m. Gradienttia voidaan mitata sekä pysty- että vaakasuunnassa. Gradienttimittauksella saadaan lähellä olevat pienet lähteet paremmin esille ja samalla syvemmältä tulevat alueelliset trendit suodattuvat automaattisesti pois (kuva 6). Magneettikentän ajalliset vaihtelut kompensoituvat pois gradienttimittauksissa, koska mittaukset tapahtuvat samanaikaisesti kaikissa antureissa. Gradienttimittausten yhteydessä ei periaatteessa tarvita magneettista referenssi maa-asemaa (Breiner 1973). Voimakkaan magneettisen myrskyn vallitessa kohteen magneettiset ominaisuudet voivat kuitenkin hetkellisesti muuttua, jolloin myös sen aiheuttama anomalia voi poiketa normaalista. Magneettisia myrskyjä on vaikea havaita ilman tutkimusalueella sijaitsevaa referenssiasemaa.



Kuva 6. Totaalikenttä sekä gradientin z -komponentti samasta kohteesta (Breiner 1973).

Gradienttimittauksissa erotuskyky riippuu anturien tarkkuudesta ja niiden välisestä etäisyydestä. Kun anturit ovat lähellä toisiaan, pienet anomaliat eivät erotu selvästi, koska anturien lukemat eivät poikkea toisistaan kovinkaan paljon. Kun anturit ovat kaukana toisistaan, pienet anomaliat erottuvat selvemmin, koska anturien lukemat poikkeavat selkeästi toisistaan.

2.1.4 TOTAALIKENTTÄ- JA GRADIENTTIMITTAUSTEN VERTAILU

Totaalikenttämittausten tulosten käsittely on työläämpää kuin gradienttimittausten, koska korjauksia ja matemaattisia suodatuksia täytyy tehdä enemmän. Totaalikenttämittauksilla saadaan enemmän informaatiota, mutta ammustutkimusten kannalta olennainen tieto eli lähellä pintaa olevat korkeataajuiset anomaliat tulevat esiin vasta tulosten käsittelyssä. Kun gradienttimittauksissa havaitaan anturien välillä tarpeeksi suuri ero kentänvoimakkuudessa, tulkitaan se anomaliaksi. Ongelmia aiheutuu, kun lähellä pintaa sijaitsee suuri anomalian aiheuttaja ja kentän taso nousee loivasti molemmissa antureissa. Mittaamalla pelkästään gradientin vaaka- tai pystykomponenttia ei kentän nousua välttämättä havaita, ja anomalia voi jäädä huomaamatta.

Totaalikenttämittausten tuloksista voidaan totaalikentän intensiteettikarttojen lisäksi myös laskennallisesti työstää gradienttikarttoja. Gradienttimittausten tuloksista ei voida laskea alueen totaalikentän intensiteettikarttoja, koska gradienttia ei tunneta tarpeeksi hyvin.

2.1.5 CESIUMHÖYRYMAGNETOMETRI

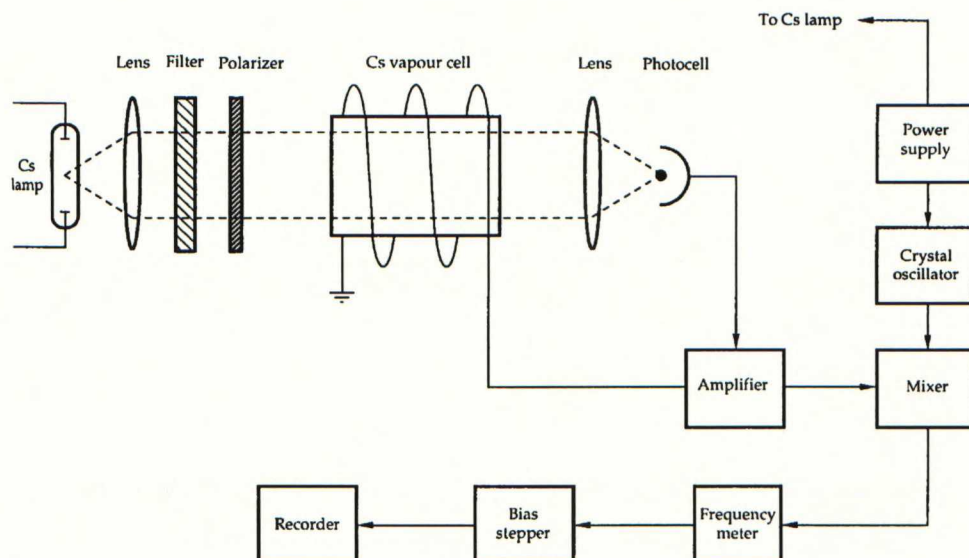
Cesiumhöyrymagnetometriä kutsutaan myös alkalihöyry-, absorptio- tai optisen pumppauksen magnetometriksi. Tämän tällä hetkellä tarkimman maastomittauksiin soveltuvan magnetometrin toiminta perustuu aineen elektronikuoren hienorakenteeseen ja ns. Zeeman-ilmiöön. Optiseen pumppaukseen perustuvia magneettikentän mittauksia voidaan tehdä aineilla, joiden uloimmalla elektronikuorella on vain yksi elektroni. Näitä ovat mm. alkalimetallit rubidium ja cesium. Cesiumhöyryn elektronit ovat osoittautuneet

sopivan parhaiten Maan magneettikentän mittauksiin (Peltoniemi 1998, Robinson et Çoruh 1988).

Magnetometrin ydin sisältää cesiumhöyrykammion, jonka ympärillä on vaihtovirtakäämi (kuva 7). Cesiumlampun lähettämä polarisoitu valo virittää kammiossa olevien cesiumatomien elektroneja korkeampaan viritystilaan. Valon intensiteetti vaihtelee cesiumhöyryn elektronien viritystilan mukaan. Cesiumhöyryn elektronit absorboivat osan valon fotoneista ja siirtyvät kuorelta A_1 korkeampaan viritystilaan kuorelle B_1 . Koska osa fotoneista absorboituu, valonsäteen intensiteetti pienenee. Kun kaikki elektronit ovat siirtyneet korkeampaan viritystilaan, fotoneita ei enää absorboidu ja valonsäteen intensiteetti on huipussaan. Valomonistinputken havaitessa valon maksimi-intensiteetin vaihtovirtalähde aktivoituu ja höyrykammion ympärille kytkeytyy vaihtuva magneetikenttä. Kentän taajuus vastaa elektronin prekessiotaajuutta ja tuottaa näin energiaa siirtämään elektroneja alikuorelta A_2 nyt tyhjänä olevalle korkeampaa energiatasoa vastaavalle kuorelle A_1 . Kun elektroni siirtyy kuorelle A_1 , se alkaa heti absorboida valoenergian fotoneita ja valon intensiteetti pienenee. Valomonistinputki havaitsee tämän välittömästi ja näin systeemi rekisteröi vaihtovirran taajuuden, joka vastaa elektronien prekessiotaajuutta. Tätä taajuutta kutsutaan Larmor-taajuudeksi (Peltoniemi 1998, Robinson et Çoruh 1988). Ulkoisen magneettikentän voimakkuus B saadaan Larmor-taajuuden f ja elektronin gyromagneettisen suhteen γ_e (γ_{cesium} on 3.49872) avulla seuraavasti (Jones 1999)

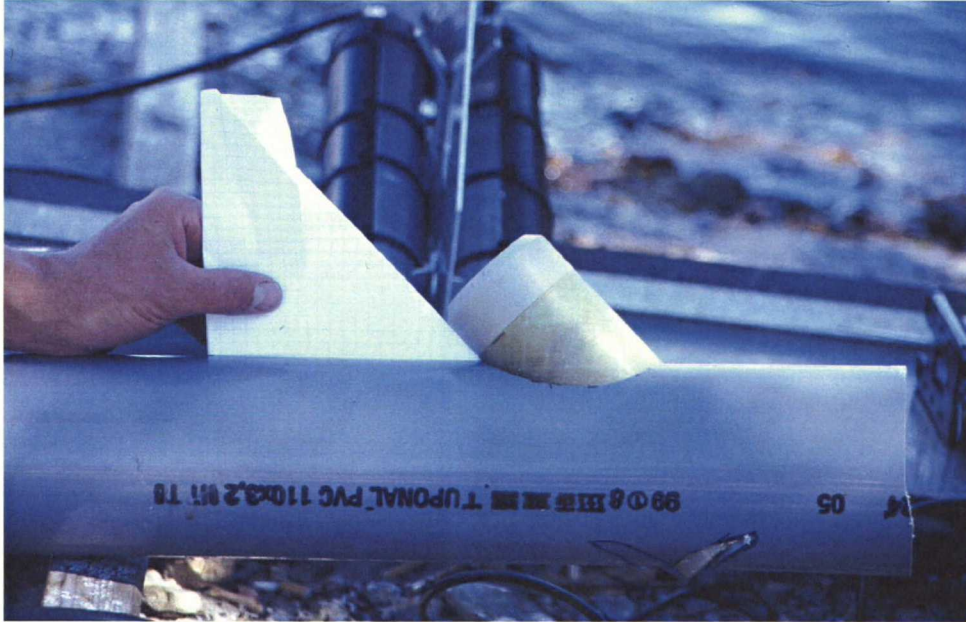
$$B = \frac{2\pi f}{\gamma_e} \quad (4)$$

Optisen pumppauksen magnetometri perustuu mittausteknisesti erittäin helppoon ja tarkkaan taajuuden mittaamiseen. Tähän perustuu laitteen suuri tarkkuus. Optisen pumppauksen magnetometrin toimintaa ovat käsitelleet tarkemmin Peltoniemi (1998), Robinson et Çoruh (1988) ja Jones (1999). Myös Geometricsin (1997) manuaalista löytyy perusteellista tietoa.



Kuva 7. Cesiumhöyrymagnetometrin pääkomponentit (Jones 1999).

Geologian tutkimuskeskuksen ammusten magneettimittauksissa käytettiin Geometricsin merikäyttöön soveltuvia G-880 cesiumhöyrymagnetometrejä. Geometricsin G-880 anturilla saavutetaan 0,02 nT herkkyys taajuudella 10 näytettä/sekunti. Magnetometri koostuu itse anturista ja sen esivahvistimesta sekä elektroniikkayksiköstä. Elektroniikkayksikkö sisältää Geometricsin laskinyksikön, joka muuttaa mitatun Larmor-taajuuden magnetometrin nT-lukemiksi. Anturin tarkkuuteen liikkuvassa aluksessa vaikuttavat pääasiassa navigointi- ja paikannusvirheet sekä kulkusuunnasta riippuva aluksen aiheuttama magneettinen häiriö. Anturin suuntaaminen oikeaan kulmaan Maan magneettikenttään nähden on olennaista. Anturin optimisuunnassa Maan magneettikenttävektori kohtaa anturin optisen akselin $30^\circ - 60^\circ$ kulmassa (Geometrics 1997). Pohjoisilla leveysasteilla anturin tulee olla 45° kulmassa, jotta mittauksia voidaan tehdä kaikilla ilmansuunnilla (kuva 8).



Kuva 8. Geometricsin cesiumhöyrymagnetometrin anturi Geologian tutkimuskeskuksen mittaussysteemissä.

2.2 SÄHKÖMAGNEETTISET MENETELMÄT

Sähkömagneettisen kentän vaimenemiseen vaikuttavat väliaineen sähköiset ominaisuudet eli sähkönjohtokyky, dielektrinen permittiivisyys ja magneettinen permeabiliteetti sekä kentän geometria. Ammustutkimuksissa käytetyillä taajuuksilla ($f < 100$ MHz) vaimeneminen riippuu pääosin kentän geometriasta eli kelavälistä. Sähkömagneettiset laitteet voidaan jakaa lähetinsignaalin perusteella aika-alueen laitteisiin (time domain, TD) sekä taajuusalueen laitteisiin (frequency domain, FD). Maatutka perustuu sähkömagneettisten aaltojen etenemiseen ja heijastumiseen sähköisiltä polarisaatio-ominaisuuksiltaan erilaisten väliaineiden rajapinnoilta.

Sähkömagneettisilla menetelmillä voidaan havaita sekä ferromagneettiset että ei-ferromagneettiset johtavat kappaleet. Kriittinen ominaisuus on kohteen sähkönjohtavuus tai oikeammin kohteen ja ympäristön sähkönjohtavuuserot (Barrow et al. 1996). Sähkömagneettisia mittauksia voidaan suorittaa myös alueilla, joiden läheisyydessä sijaitsee etsittävien kohteiden lisäksi suuria

ferromagneettisia häiriötekijöitä. Näiden häiriötekijöiden vaikutus voidaan kompensoida pois mittaustuloksista.

Teoriassa sähkömagneettinen menetelmä voi osoittautua vaaralliseksi, mikäli ollaan tekemisissä nykyaikaisilla sähkösytyttimillä toimivien ammusten kanssa. Kaupallisesti markkinoilla olevissa sähkömagneettisissa ilmaisimissa käytetään niin alhaisia virtatiheyksiä sekä indusoituneita jännitteitä, ettei detonaatio ole mahdollista (Panama report 1997).

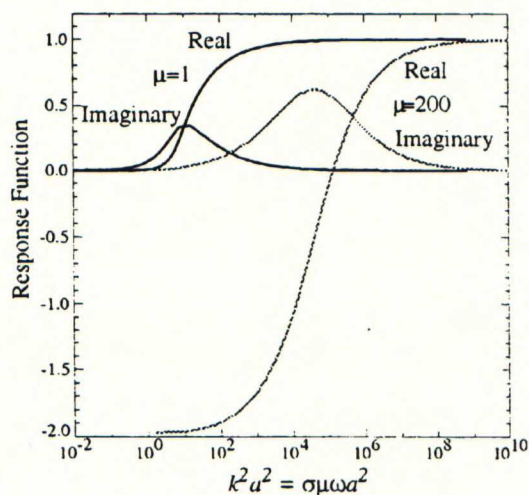
2.2.1 TAAJUUSALUEEN SÄHKÖMAGNEETTINEN MITTAUS ELI PIENOISSLINGRAM

Taajuusalueen sähkömagneettiset menetelmät perustuvat sähkömagneettiseen induktioon. Lähetinkelalla aikaansaadaan primäärinen magneettikenttä, joka synnyttää johdekappaleessa sähkömotorisen voiman, joka puolestaan aiheuttaa johteen ominaisuuksista riippuvan pyörrevirran. Pyörrevirta aiheuttaa sekundäärisen magneettikentän. Kokonaiskenttä indusoi vastaanotinkelaan jännitteen, joka on suoraan verrannollinen primääri- ja sekundäärikenttien summaan. Vertaamalla vastaanotetun sekundäärikentän amplitudia ja vaihetta lähetettyyn primäärikenttään saadaan tietoa johtavien kohteiden ominaisuuksista. Primääri- ja sekundäärikentän suhde esitetään yleensä miljoonasosina (ppm). Menetelmän herkkyys riippuu ulkoisesta sähkömagneettisesta kohinatasosta (Won 1995). Taajuusalueen laite lähettää signaalia vakiotaaajuudella. Kohteen sijainti antureihin nähden ei vaikuta vaihe-eroon.

Sähkömagneettinen malli tyypillisille ammustarvikkeille on huomattavasti magneettista mallia monimutkaisempi. Ammuksia voidaan mallintaa pallomallilla, joka paikallisesti tasaisessa ja ajallisesti muuttuvassa kentässä indusoi dipolikentän. Tietyllä lähetintaaajuudella magneettinen momentti saadaan kaavalla

$$m = -2\pi a^3 H_0 W \quad (5)$$

missä a on kohteen säde, H_0 primäärikentän voimakkuus ja W kompleksinen vastefunktio, joka määrittää lähetin- ja vastaanotinsignaalien välisen vaihe-eron (Barrow et al. 1996). Vastefunktio riippuu pallon säteestä r , johtavuudesta σ , magneettisesta permeabiliteetistä μ ja lähetintaajuudesta ω . Ferromagneettisen sekä anti-ferromagneettisen kappaleen vastefunktiot on esitetty kuvassa 9 (Barrow et al. 1996). Kuvassa 10 on taajuusalueella toimiva Geonicsin EM31 – sensori, jota käytetään maahan hautautuneiden vaarallisten metallijätteiden paikallistamiseen.



Kuva 9. Kompleksinen vastefunktio, W , ferromagneettinen pallo ($\mu=200$) ja ei-ferromagneettinen pallo ($\mu=1$) (Barrow et al. 1996).

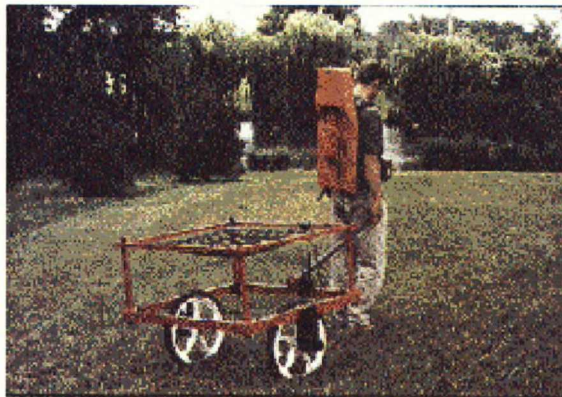


Kuva 10. Geonicsin taajuusalueella toimiva sähkömagneettinen sensori EM31 (www.geonics.com/em31.html).

2.2.2 AIKA-ALUEEN SÄHKÖMAGNEETTINEN MENETELMÄ

Aika-alueella toimiva sähkömagneettinen laite lähettää vakiotaajuuden sijasta pulssimuotoisen primäärikentän, joka sisältää monia taajuuksia. Vastaanottimessa pulssi rekisteröidään aika-alueessa eli siitä otetaan näytteitä tietyn ajan välein. Vastaanotettu pulssi muunnetaan taajuusalueeseen Fourier-muunnoksella. Vastefunktio saadaan alkuperäisen ja vastaanotetun pulssin spektrien osamääränä.

Aika-alueessa lähetetty pulssi indusoi pyörrevirtoja lähistöllä sijaitseviin metallikappaleisiin. Pyörrevirtojen voimakkuus ja vaimeneminen riippuu kappaleen koosta ja materiaaliominaisuuksista. Pyörrevirtojen vaimeneminen synnyttää sekundäärisen magneettikentän, jota mitataan vastaanotinkelalla. Kun sekundäärikentän mittaus tehdään sopivan viiveajan kuluttua pulssin lähetyksen jälkeen, maaperässä syntyneet pyörrevirrat ovat jo vaimentuneet ja jäljellä ovat ainoastaan metallisissa kohteissa indusoituneet sekundäärikentät. Vastefunktio on selkeä piikki, jonka avulla saadaan kohteet paikannettua nopeasti ja tarkasti. Kohteen syvyys voidaan yleensä arvioida vastefunktion leveyden perusteella (McDonald et Robertson 1996). Kuvassa 11 on Geonicsin EM61 pulssi-induktiosensori eli aika-alueen sensor.



Kuva 11. Geonicsin sähkömagneettinen aika-alueen pulssi-induktiosensori EM61, jota käytetään ammusten paikantamiseen (www.geonics.com/em61.html).

2.2.3 MAATUTKA

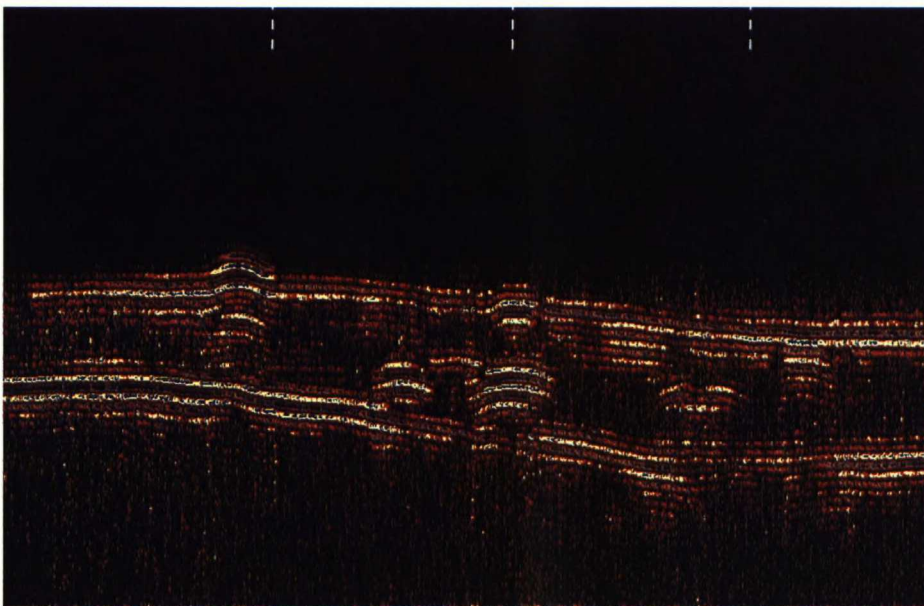
Sähkömagneettisen aallon etenemiseen ja heijastumiseen väliaineessa vaikuttaa väliaineen dielektrisyys ja susceptibiliteetti. Mikäli väliaineen susceptibiliteetti on pieni, riippuu sähkömagneettisen aallon eteneminen ainoastaan dielektrisyydestä. Maassa dielektrisyyteen vaikuttaa eniten väliaineen vesipitoisuus. Sähkömagneettisen aallon vaimeneminen väliaineessa on suoraan verrannollinen väliaineen sähkönjohtavuuteen. Hyvin sähköä johtavissa väliaineissa (johtavuus yli 10 mS/m) vaimeneminen on merkittävää ja vaikeuttaa tai estää kokonaan maatutkan käytön, mikä rajoittaa menetelmän käyttöä mm. merivedessä. Itämeren murtoveden johtavuus vaihtelee välillä 100 - 3000 mS/m (Aromaa 1995). Käytetyn lähettimen taajuus vaikuttaa syvyysulottuvuuteen. Korkeataajuisilla (> 500 MHz) antennilla saavutetaan hyvä ohuiden kerrosten erottelukyky, mutta syvyysulottuvuus jää pieneksi. Matalataajuisien antennien erottelukyky on karkea, mutta syvyysulottuvuus korkeataajuisia antennoja parempi (Hänninen et al. 1991).

Tutka-antenni lähettää maaperään korkeataajuisen lyhytaaltoisen sähkömagneettisen pulssin. Osa aaltoenergiasta heijastuu takaisin väliaineen sähköisiltä rajapinnoilta ja osa jatkaa etenemistään rajapinnan läpi. Antennilla mitataan takaisin heijastuneen aallon kulkuaika sekä amplitudi. Mittaus toistetaan nopeassa tahdissa tutkan liikkeessä ja näin saadaan jatkuva profiili väliaineen sähköisistä rajapinnoista (Hänninen et al. 1991).

Maatutkamenetelmä ei sovellu ammustutkimuksiin suoraan. (Won 1995, McDonald et Robertson 1996) Ammukset ovat hautautuneet pääasiassa maaperän pintakerrokseen, joka on geologisilta ominaisuuksiltaan erittäin vaihtelevaa. Tämä hankaloittaa maatutkatulosten tulkintaa ja aiheuttaa myös vääriä tulkintoja. Maatutkan alaspäin suuntautuva keila on lähellä maan pintaa hyvin kapea. Tarvitaan tiheä tutkimuslinjasto, jotta koko tutkimusalueelle saadaan riittävä peitto. Maanpäällä tehdyissä mittauksissa tutka-antennin tulee olla kontaktissa maaperän kanssa, mikä muodostaa pienen turvallisuusriskin ammustutkimuksissa. Maatutkan käyttö kuivalla maalla edellyttää

tutkimusalueen geologisten olosuhteiden tarkkaa tuntemista, mistä johtuen sen käyttö voi tulla kysymykseen vasta tutkimusten loppuvaiheessa (Won 1995).

Suomessa Geologian tutkimuskeskus on paikantanut maatutkalla jään päältä sodan aikana lampeen pudonneita ammuksia. Tutkimuksissa havaittiin useita selviä, pistemäisiä heijasteita lammen pohjassa. Havainnoissa oli mukana niin mahdollisista ammuksista kuin metalliromusta, suuremmista kivistä, puunrungoista, kaapeleista ja viemäriputkista tulevia tutkaheijasteita. Jäältä käsin tehdyllä magneettisella gradienttimittauksella pyrittiin tämän jälkeen selvittämään mahdollisten kohteiden magneettisuus ja näin rajaamaan pois epätodennäköisiä kohteita. Käytetyllä tutkataajuudella 80 MHz saavutetaan jopa 15 m syvyyssulottuvuus, mutta näissä tutkimuksissa syvyyssulottuvuus jäi 6 – 7 metriin. Tämä johtui ilmeisesti lammen veden korkeasta sähkönjohtavuudesta. Kuvassa 12 näkyy Kuopion testilinjan maatutkaluotauksen tulos. (Sutinen 1998) Suomen oloissa maatutka soveltuu ilmeisen hyvin jään päältä tehtäviin alustaviin ammustutkimuksiin, mikäli vesisyvyys ja veden sähkönjohtavuus eivät kasva liian suuriksi.



Kuva 12. *Kuopion Valkeisenlammen testilinjan maatutkahavainnot (Sutinen 1998).*

2.3 JÄRJESTELMÄN VALINTA

Kokkolan syväväyläprojektissa magneettinen mittausjärjestelmä osoittautui käytettävissä olevan ajan puitteissa helpommin toteutettavaksi kuin sähkömagneettinen järjestelmä. Lähes kaikki komponentit – anturit, mittaustulosten tallennus- ja tulkintaohjelmat – olivat helposti saatavilla. Sähkömagneettisen menetelmän kehittäminen olisi vienyt paljon enemmän aikaa sekä resursseja.

Cesiumhöyrymagnetometrit ovat tällä hetkellä markkinoiden tarkimpia. Anturien välinen etäisyys voi olla suurempi kuin esim. fluxgate –antureilla, joten tarvitaan vähemmän antureita saman kattavuuden aikaansaamiseksi. Cesiumhöyryantureita käytettäessä myös pystyetaisyys tutkittaviin kohteisiin voi olla suurempi kuin fluxgate antureilla.

Totaalikenttämittauksissa tarvittiin neljä cesiumhöyryanturia, jotta saatiin katettua 6,5 m leveä alue. Gradienttimittauksissa antureita olisi tarvittu kaksinkertainen määrä. Cesiumhöyryanturit muodostivat valtaosan mittausjärjestelmän hankintakustannuksista, joten niiden määrä pyrittiin pitämään mahdollisimman pienenä. Geologian tutkimuskeskuksella on vuosien kokemus aeromagneettisesta totaalikenttämittauksesta, jota varten kehitetyt datankeräys- ja alkukäsittelyohjelmat olivat pienin muutoksin sovellettavissa meriympäristössä tapahtuvaan ammusten paikantamiseen. Totaalikenttämittauksilla saatavaa horisontaali-informaatiota pidettiin riittävänä.

3. ETSITTÄVIEN KOHTEIDEN FYSIKAALISET OMINAISUUDET

3.1 MATERIAALIT, MUOTO JA DIMENSIOT

Ammukset ovat pääasiassa ferromagneettista metallia, rautaa ja valuterästä. Sotaaikana ammuksia on valmistettu epämääräisistä metalliseoksista. Ammuksia on valmistettu kokonaan tai osittain myös epämagneettisista materiaaleista kuten messingistä sekä betonista. Kokkolassa on upotettu sekä Krimin sodan aikaisia että toisen maailmansodan aikaisia ammuksia, joten on mahdotonta sanoa tarkasti, mitä materiaaleja meren pohjaan upotetuissa ammuksissa on käytetty (Maunula 1999).

Vuosikymmeniä merenpohjassa maanneita ammuksia on vaikea tunnistaa. Kuvassa 13 näkyy vanhoja mereen upotettuja kranaatteja. Kuvan 14 kranaatinheittimen ammus ei ole Kokkolasta. Se on kuitenkin upotettu samoihin aikoihin kuin Kokkolan ammukset. Leväkerrosten alta paljastuu lähes vahingoittumaton metallipinta, joten suolavesi ei ole aiheuttanut huomattavia upotettujen ammusten magneettisiin ominaisuuksiin vaikuttavia kemiallisia muutoksia.

Useimmat ammukset ovat muodoltaan pitkulaisia sivusuhteen vaihdellessa neljästä tai viidestä yhteen eli ammuksen pituus on nelin- tai viisinkertainen halkaisijaan nähden (Bell 1997). Kranaattien koko ilmoittaa halkaisijan, esim. 152 mm. Kokkolassa on upotettu mereen erilaisia räjähteitä aina sytyttimistä satojen kilojen painoisiin lentopommeihin asti. Kuvassa 15 näkyy merenpohjasta

löydettyjä 122 mm kranaatteja. Varastossa säilytettyjä eri kaliiperisia vanhoja kranaatteja on esitetty kuvassa 16.



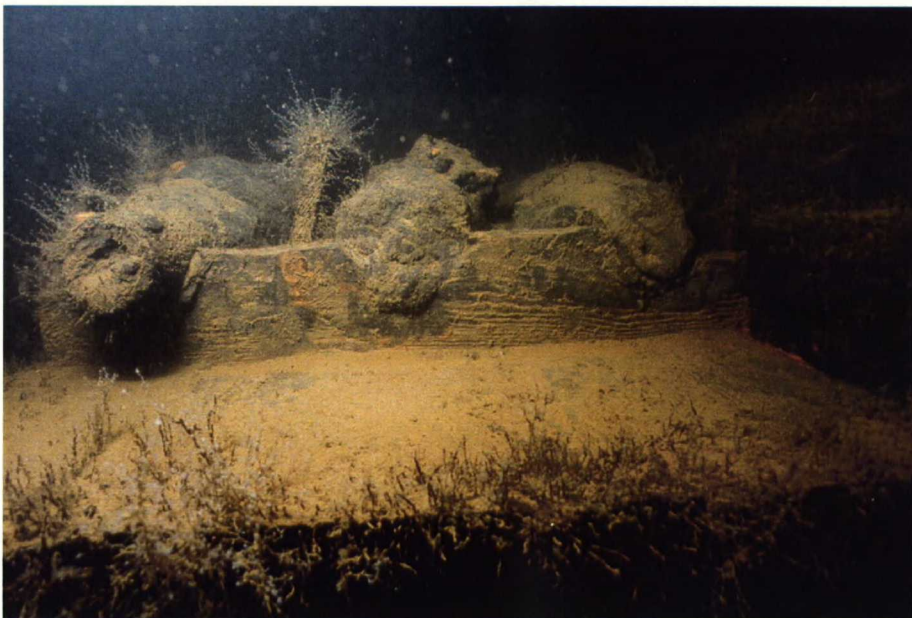
Kuva 13. Mereen upotettuja vanhoja kranaatteja (kuva ltn Lahtinen, Saaristomeren Meripuolustusalue, 1997).



Kuva 14. Avautuvalla pyrstöllä varustettu ilmeisesti 122 mm kranaatinheittimen ammus. Leväkasvuston alta paljastuu lähes vahingoittumaton metallipinta. (kuva ltn Lahtinen, Saaristomeren Meripuolustusalue, 1997)



a)



b)

Kuva 15. a) ja b) Merenpohjasta löydettyjä 122 mm kranaatteja. (kuva ltn Lahtinen, Saaristomeren Meripuolustusalue, 1997)



Kuva 16. Varastossa säilytettyjä vanhoja kranaatteja, vasemmalta lukien 122 mm, 76 mm, 40 mm, 37 mm ja 81 mm.

3.2 MAGNEETTISET OMINAISUUDET

3.2.1 SUSKEPTIBILITEETTI

Magneettinen susceptibiliteetti ilmaisee aineen kyvyn magnetoitua. Metallin susceptibiliteetti-arvot ovat huomattavasti korkeampia kuin kivilajien ja kallioperän vastaavat arvot. Teräslevyjen magneettisia ominaisuuksia ovat tutkineet Eskola et al. (1999) Heidän mukaansa eri terästyypin susceptibiliteetti-arvot κ vaihtelevat välillä 200 – 500. Barrow et al. (1996) arvioivat tyypillisen ferromagneettisen kappaleen suhteellisen magneettisen permeabiliteetin μ_r olevan luokkaa 200. Susceptibiliteetin ja suhteellisen permeabiliteetin välillä vallitsee yhteys $\kappa = \mu_r - 1$ eli tällöin myös susceptibiliteetti on luokkaa 200. MAOL-taulukon (1989) mukaan 99,9 % raudan suhteellinen permeabiliteetti μ_r vaihtelee välillä 250 – 5350 ja valuraudan välillä 50 – 700. Teknillisen korkeakoulun Dynaamisen kentäteorian oppikirjassa (Sihvola & Lindell 1996) epäpuhtaan raudan permeabiliteetti vaihtelee välillä 150 – 5000 ja teräksen välillä 120 – 2000.

3.2.2 DEMAGNETOITUMA

Ferromagneettisen kappaleen ollessa ulkoisen magneettikentän H_0 vaikutuksen alaisena muodostuu sen sisälle magneettikenttä. Tätä sisäistä kenttää kutsutaan demagnetoivaksi kentäksi H_{demagn} . Demagnetoiva kenttä pienentää kappaleen magnetoitumaa, koska kappaleen sisälle syntyvä kenttä on ulkoisen kentän suhteen vastakkaisuuntainen. Kappaleen sisällä vaikuttava magneettikenttä on demagnetoivan kentän verran ulkoista kenttää pienempi eli $H_{sis} = H_0 - H_{demagn}$. Sisäisen kentän voimakkuus vaihtelee kappaleen eri suunnissa riippuen kappaleen muodosta. Ammukset ovat muodoltaan pitkulaisia ja niiden muotoa voidaan hyvin approksimoida pyörähdysellipsoidilla. Demagnetoiva kenttä huomioidaan tavallisesti käyttämällä ns. tehollista eli näennäistä susceptibiliteettia κ_e , joka sisältää todellisen susceptibiliteetin κ sekä kappaleen demagnetoitumakertoimen N (Peltoniemi 1988). Tämän työn luvussa 3.3.2 on esitetty pyörähdysellipsoidin demagnetoitumakertoimien määrittäminen.

3.2.3 PYSYVÄ MAGNETOITUMA

Havaittu magnetoituma koostuu Maan magneettikentän indusoimasta magnetoitumasta M_i sekä pysyvästä magnetoitumasta M_r . Indusoitunut magnetoituma on aina ulkoisen kentän suuntainen riippumatta kappaleen asennosta. Pysyvä magnetoituma on riippumaton ulkoisesta kentästä eli se on olemassa vaikka kappale ei olisi ulkoisen magneettikentän vaikutuksen alaisena. Pysyvän magnetoituman suunta kappaleeseen nähden ei muutu kappaleen asennon vaihdellessa. Pysyvästä magnetoitumasta käytetään myös nimityksiä remanentti ja permanentti magnetoituma sekä remanenssi. Kappaleen pysyvän magnetoituman M_r ja indusoituneen magnetoituman M_i välinen suhde ilmoitetaan Q -suhteena, joka lasketaan seuraavasti

$$Q = \frac{M_r}{M_i} \quad (6)$$

Ammuksilla, jotka on laukaistu tai pudotettu lentokoneesta, on yleensä maahan osumisesta aiheutuneen iskun vuoksi matala pysyvä magnetoituma. Kappaleen

saama kova isku on pyyhkinyt pois alkuperäisen remanentin magnetoituman ja kappale on iskun jälkeen magnetoitunut uudelleen (Bell 1997).

Kokkolan tapauksessa on kyse tarkoituksella hävitetyistä, käyttämättömistä ammuksista. Nämä ammukset eivät ole saaneet vastaavia kovia iskuja, joten niiden remanentti magnetoituma koostuu suurelta osin valuprosessin aikana syntyneestä magnetoitumasta. Kokkolan ammuksiin myöhemmin syntyneitä pysyviä magnetoitumia ovat maanpäällisen varastoinnin ja meressäolon aikana viskoosiremanenssin kautta syntyneet pehmeämmät pysyvät magnetoitumat. Tällöin niiden remanentti magnetoituma on mahdollisesti vähitellen muuttunut Maan kentän suuntaiseksi. Tämä vahvistaisi indusoitunutta magnetoitumaa ja näin ollen suurentaisi havaittavaa anomaliaa ja todennäköisyyttä, että ammus havaitaan magneettisilla mittauksilla. Varastossa ja meressäolon aikana syntyneet pysyvät magnetoitumat eivät kuitenkaan ole suuruudeltaan valuprosessin aikana syntynyttä pysyvää magnetoitumaa suurempia. Mitä kovempaa teräs on, sitä suurempi on remanentin magnetoituman osuus. Ammusten remanentti magnetoituma voi olla suuruusluokaltaan neljä tai jopa kymmenen kertaa indusoituneen magnetoituman suuruinen (Breiner 1973).

3.2.4 PYSYVÄN MAGNETOITUMAN MÄÄRITYS MITTAUKSILLA

Ferromagneettisen kappaleen remanentti magnetoituma voidaan määrittää mittaamalla kappaleen magnetoituma normaaliasennossa sekä ylösalaisin käännettynä. Pystyanomalia saadaan Parasniksen (1997) mukaan kappaleen ollessa normaaliasennossa seuraavasti

$$\Delta B_z(1) = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{(M_{iz} + M_{rz})V}{a^3} \quad (7)$$

Missä a on etäisyys anturin ja kappaleen massakeskipisteen välillä, M_i on indusoitunut magnetoituma, M_r remanentti magnetoituma, V kappaleen tilavuus ja μ_0 tyhjiön permeabiliteetti. Kun kappale käännetään ylösalaisin on havaittu anomalia

$$\Delta B_z(2) = \frac{\mu_0 (M_{iz} - M_{rz})V}{2\pi a^3} \quad (8)$$

Indusoitunut magnetoituma M_i sekä remanentti magnetoituma M_r saadaan edellä mainituilla kaavoilla seuraavasti

$$M_{rz} = \pi \frac{a^3}{V} \frac{\Delta B_z(1) - \Delta B_z(2)}{\mu_0} \quad (\text{A/m}) \quad (9)$$

$$M_{iz} = \pi \frac{a^3}{V} \frac{\Delta B_z(1) + \Delta B_z(2)}{\mu_0} \quad (\text{A/m}) \quad (10)$$

Tässä työssä on mittaamalla määritetty 32 mm, 37 mm ja 40 mm kranaattien pysyvä magnetoituma. Mittaukset tehtiin Porvoon Emäsalossa puurakenteisessa talossa, jossa magneettisia mittauksia häiritsevät tekijät pyrittiin minimoimaan. Mittaustulokset käyvät ilmi taulukosta 1.

Taulukko 1. 32 mm, 37 mm ja 40 mm kranaattien indusoitunut ja remanentti magnetoituma sekä näillä luvuilla lasketut Q -suhteet.

kranaatin kaliiperi	Remanentti magnetoituma (A/m)	Indusoitunut magnetoituma (A/m)	Q -suhde
32 mm	428	424	1,01
37 mm	227	558	0,41
40 mm	131	244	0,54

Mittausten perusteella voidaan havaita näiden kranaattien Q -suhteen vaihtelevan 0,4 – 1,0 välillä. 32 mm kranaatilla remanentti ja indusoitunut magnetoituma ovat yhtä suuria eli Q -suhde on 1. Jos kranaatti on sellaisessa asennossa, että remanentti ja indusoitunut magnetoituma ovat vastakkaissuuntaiset, ne kumoavat toisensa. Tällaisessa tilanteessa magnetometrillä ei voida millään etäisyydellä havaita kyseistä 32 mm kranaattia. Vastaavasti 37 mm ja 40 mm kranaattien Q -

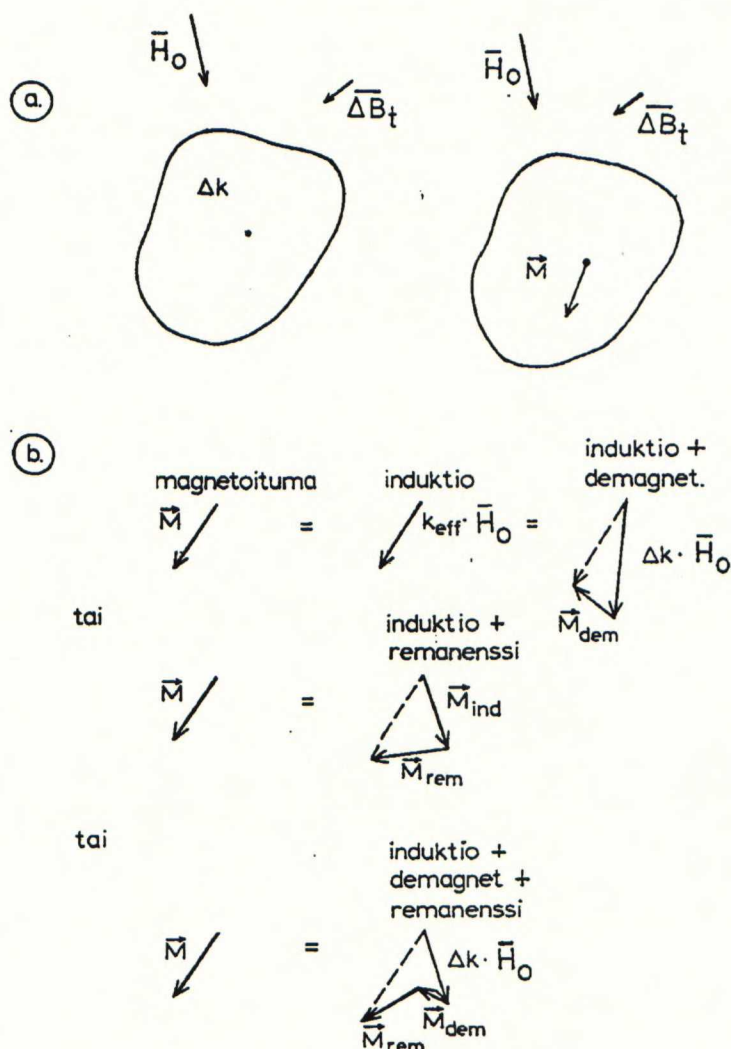
suhteet ovat 0,4 ja 0,5. Näillä kranaateilla remanentti magnetoituma ei voi täysin kumota indusoitunutta magnetoitumaa, mutta se voi kylläkin voimistaa tai heikentää havaittavaa anomaliaa.

Koska remanenttia magnetoitumaa määritettiin vain kolmesta kranaatista, ei näiden mittaustulosten pohjalta voi tehdä suuria yleistyksiä. Voidaan silti todeta, että kranaateilla on erisuuruisia pysyviä magnetoitumia. Pysyvä magnetoituma vaikuttaa kohteen aiheuttaman anomalian suuruuteen ja voi pahimmillaan kumota indusoituneen magnetoituman täysin, jolloin kranaattia ei voida magnetometrillä havaita.

3.3 MAGNEETTISEN DIPOLIN ANOMALIA

Ammusten aiheuttamat anomaliat vastaavat kohtalaisesti dipolimallia. Dipolin ekvivalenttisäde tarkoittaa sellaisen teräspallon sädettä, jolla on sama magneettinen momentti kuin ammuksella. Dipolin ekvivalenttisäde on hyvä estimaatti ammusten kaliiperista ja siitä käytetään myös nimitystä näennäinen koko. Havaitut anomaliat jaotellaan tavallisesti juuri näennäisen koon perusteella. (DeProspero 1996) Anomaliavektori koostuu kolmesta eri osasta: induktio-, demagnetoituma- ja remanenssikomponentista, kuva 17 (Peltoniemi 1998).

Pitkulainen kappale magnetoituu helpoiten pituusakselinsa suuntaisesti. Tästä johtuen kappaleen magneettinen momentti riippuu kappaleen suuntauksesta Maan magneettikenttään nähden. Suurin anomalia syntyy silloin, kun kappaleen pituusakseli on saman suuntainen Maan kentän kanssa ja pienin silloin, kun kappaleen pituusakseli on kohtisuorassa Maan magneettikenttää vastaan (DeProspero 1996). Suomen leveysasteilla Maan magneettikentän inkliinaatio on luokkaa 75° eli melko pystyssä. Ammukset eivät ole pystyssä meren pohjassa vaan pikemminkin makaavat enemmän tai vähemmän lappeeltaan. Kappaleiden suuntauksesta johtuen kohteista ei saada rekisteröityä suurinta mahdollista anomaliaa.



Kuva 17. Magnetoitumavektori M summautuu vektoriaalisesti kolmesta eri komponentista: M_{ind} eli induktiokomponentti, M_{dem} eli demagnetoitumakomponentti ja M_{rem} eli remanenssikomponentti (Peltoniemi 1998).

Yksittäinen ammus aiheuttaa selkeän dipolaarisen anomalian. Kun ammuksia tai muita metallikappaleita on kasassa useampia tai niitä on ripoteltuna pitkin meren pohjaa, on anomalian muoto huomattavasti monimutkaisempi. Pienten metallikappaleiden anomaliat summautuvat yhteen isommaksi anomaliaksi. Isojen metallikohteiden lähistöllä pienet kohteet voivat jäädä kokonaan huomaamatta. Kuvassa 18 näkyy Kokkolasta löydettyjä 81 mm kranaatinheittimen ammuksia.

Isojen metallikohteiden lähistöllä pienet kohteet voivat jäädä kokonaan huomaamatta. Kuvassa 18 näkyy Kokkolasta löydettyjä 81 mm kranaatinheittimen ammuksia.



Kuva 18. Laatikollinen 81 mm kranaatinheittimen ammuksia merenpohjassa.
(kuva ltn Lahtinen, Saaristomeren Meripuolustusalue, 1997)

3.3.1 KENTÄN VAIMENEMINEN ETÄISYYDEN FUNKTIONA

Metallisen kohteen aiheuttama magneettinen anomalia vaimenee voimakkaasti etäisyyden funktiona riippuen myös kohteen muodosta. Magneettinen anomalia B noudattaa kaavaa (Breiner 1973)

$$B = \frac{m}{r^n} \quad (11)$$

Missä m on kohteen magneettinen momentti, r etäisyys kohteeseen ja n vakio, ns. rakenneindeksi, joka riippuu kohteen muodosta. Pallomaiselle kohteelle $n = 3$, putkimaiselle kohteelle $n = 2$ ja levymäiselle kohteelle $n = 1$. Ammukset ovat muodoltaan pitkulaisia ja pyöreähköjä eli melko lähellä pyörähdysellipsoidia. Kirjallisuudessa ammuksille on usein käytetty arvoa $n = 2,7$. Ammusten muotoa

voidaan aproksimoida myös pallomallilla, jolloin käytettäisiin arvoa $n = 3$. Tällöin anomalia pienenee alkuperäisestä kahdeksasosaan etäisyyden kaksinkertaistuessaa.

Mittauksissa on havaittu anomalia B_1 sekä etäisyys r_1 . Kun käsitellään saman kohteen aiheuttamaa anomaliaa eri etäisyyksillä, voidaan magneettinen momentti m supistaa pois, koska se on sama molemmissa tapauksissa. Näin ollen saamme johdettua kaavan 12 anomalian B_2 laskemiseksi halutulla etäisyydellä r_2 .

$$B_2 = B_1 \frac{r_1^n}{r_2^n} \quad (12)$$

Samalla kaavalla voidaan myös määrittää mitatun anomalian havaintoetäisyys seuraavasti

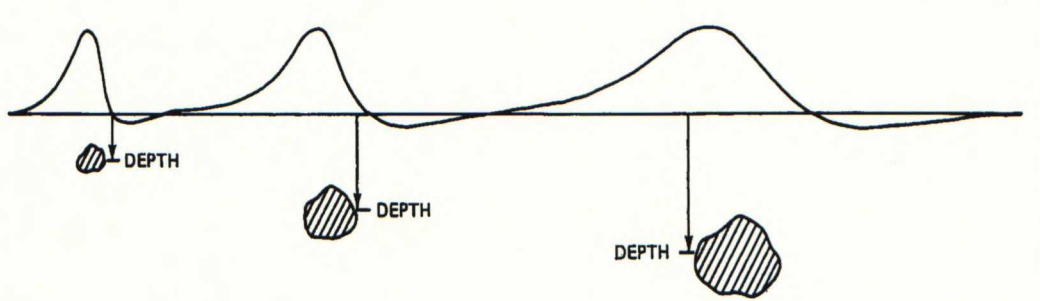
$$r_2 = \sqrt[n]{\frac{B_1}{B_2}} r_1$$

Koska mittauksissa havaittujen kohteiden muodosta ei ole varmuutta, saadaan kyseisellä kaavalla vain suuntaa antavaa tietoa. Kolmen metrin etäisyydellä havaittu 1 nT anomalia olisi lähempää, esim. kahden metrin päästä mitattuna luokkaa 3,0 – 3,4 nT riippuen kohteen muodosta, asennosta jne. Taulukosta 2 käy ilmi kaavan 12 avulla määritetty saman anomalian suuruus eri havaintoetäisyyksillä sekä rakenneindeksin arvoilla.

Ainoa luotettava ja vääristymätön informaatio on mitattu anomalia. Magneettisten tulosten tulkinnassa on tärkeää sekä anomalian suuruus että muoto. Havaintoetäisyyden kasvaessa anomalian amplitudi pienenee ja aallonpituus kasvaa. Kuvassa 19 näkyy kolmen eri kokoisen kappaleen aiheuttama anomalia. Anomaliaoilla on sama amplitudi, mutta eri aallonpituus. Lähellä pintaa sijaitseva pieni kohde aiheuttaa terävän anomalian ja syvemmällä oleva suuri kohde leveän anomalian.

Taulukko 2. Havaintoetäisyyden ja rakenneindeksin vaikutus anomalian suuruuteen.

Mittattu anturin etäisyys pohjasta (m)	Mitattu anomalia (nT)	Laskettu anomalia 2 m etäisyydellä pohjasta, $n=3$ (nT)	Laskettu anomalia 2 m etäisyydellä pohjasta, $n=2,7$ (nT)
3	1	3,4	3,0
3	2	6,8	6,9
3.5	1	5,4	4,5
3.5	2	10,7	9,1



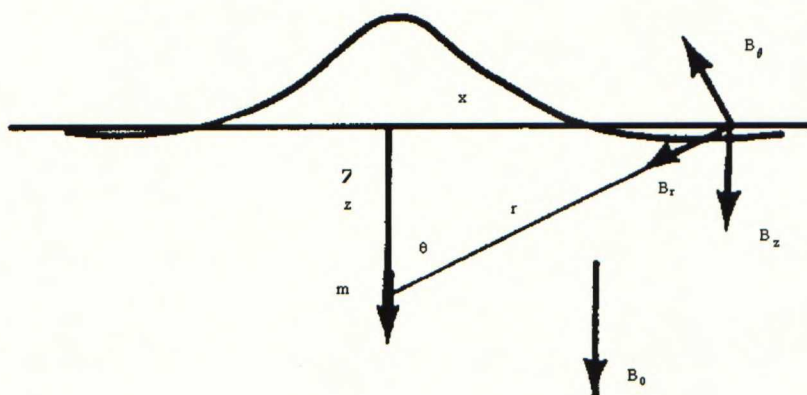
Kuva 19. Havaintoetäisyyden vaikutus anomalian muotoon (Breiner 1973).

3.3.2 ANOMALIAN LASKENNALLINEN MALLINNUS

Ammustarvikkeet ovat muodoltaan pitkulaisia, joten niiden muodon teoreettiseen mallinnukseen sopii hyvin ellipsoidi. Ammuksen magneettista anomaliaa voidaan kuvata kohtuullisen tarkasti dipolin anomaliakentän avulla, kun mittausetäisyys ammuksista on riittävän suuri. Riittävän suurena etäisyytenä pidetään kolme kertaa ammuksen pituutta. Tätä lähempänä dipolimalli antaa tulokseksi liian pieniä anomaliaita. Dipolin anomalian amplitudi B maan pystykentässä voidaan laskea lausekkeesta

$$B_z = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{m(2z^2 - x^2)}{(z^2 + x^2)^{5/2}} = \mu_0 H \quad (13)$$

missä m on (vertikaalinen) dipolimomentti (Breiner 1973). Mittausetäisyys määrittyy koordinaattien x ja z avulla kuvan 20 mukaisesti.



Kuva 20. Dipolin magneettinen anomalia pystykentässä ja sen laskentageometria (Breiner 1973).

Magneettinen momentti m voidaan laskea ammuksen tilavuuden V ja magnetoituman M tulona seuraavasti

$$m = VM = V(M_i + M_r) \quad (14)$$

missä M_i on indusoitunut magnetoituma ja M_r on remanentti magnetoituma. Ammusten anomalia-laskuissa oletetaan aluksi remanentti magnetoituma pieneksi verrattuna indusoituun magnetoitumaan ($M_r \approx 0$). Indusoitunut magnetoituma saadaan lausekkeesta

$$M_i = H_i \kappa_e = \frac{\kappa}{1 + N_i \kappa} H_i \quad (15)$$

missä H_i on ammuksen vaikuttava ulkoinen magneettikenttä, κ_e on ammuksen näennäinen (tehollinen) susceptibiliteetti, κ on ammusmateriaalin todellinen susceptibiliteetti ja N_i on ammuksen demagnetoitumakerroin suunnassa i (Parasnis 1997). Tehollisen susceptibiliteetin ja demagnetoitumakertoimen avulla huomioidaan ammuksen sisäisen demagnetoivan kentän vaikutus, jonka tuloksena ammuksen indusoitunut magnetoituma pienenee.

Ferromagneettisen ammusmateriaalin susceptibiliteetti on usein niin suuri, että indusoituneen magnetoituman lauseke voidaan esittää likiarvomuodossa

$$M_i = \frac{1}{\frac{1}{\kappa} + N_i} H_i \approx \frac{H_i}{N_i} \quad (16)$$

jolloin magnetoituman määrittää suoraan ammuksen demagnetoitumakerroin. Kertoimen arvo riippuu ammuksen muodosta ja ulkoisen kentän suunnasta ammuksen nähden. Ammukset ja lentopommit ovat usein likimain pyörähdysellipsoidin muotoisia, jolloin ellipsoidin puoliakselien pituudet ovat $a > b = c$. Demagnetoitumakertoimet näiden akselien suunnassa olkoot N_a , N_b ja $N_c = N_b$. Kerrointen summa on yksi, ja kertoimet akselien suunnassa voidaan laskea kaavoilla

$$N_a = \frac{1}{p^2 - 1} \left[\frac{p}{2(p^2 - 1)^{1/2}} \ln \left(\frac{p + (p^2 - 1)^{1/2}}{p - (p^2 - 1)^{1/2}} \right) - 1 \right] \quad (17)$$

$$N_b = \frac{p}{2(p^2 - 1)} \left[p - \frac{1}{2(p^2 - 1)^{1/2}} \ln \left(\frac{p + (p^2 - 1)^{1/2}}{p - (p^2 - 1)^{1/2}} \right) \right] \quad (18)$$

missä $p = a/b$ (Osborn 1945). Kun vielä huomioidaan pyörähdysellipsoidin tilavuuden lauseke, saadaan pystykentässä olevan ammuksen indusoituneelle dipolimomentille kaavat

$$m_a = \frac{4\pi}{3} ab^2 \frac{H_i}{N_a} \quad (19)$$

$$m_b = \frac{4\pi}{3} ab^2 \frac{H_i}{N_b} \quad (20)$$

Momentit m_a ja m_b liittyvät ammuksiin, joiden pisin akseli on vastaavasti pystytai vaakasuunnassa. Ammusellipsoidin ontelon vaikutus huomioidaan kertomalla dipolimomentti m normalisoidulla magneettisella momentilla m_n . Normalisoitu magneettinen momentti ellipsoidin kummankin pituusakselien suunnassa käy ilmi luvun 4 taulukosta 4 (Frumkis et Kaplan 1999). Sijoittamalla momenttien lausekkeet yhtälöön 13 voidaan lopuksi laskea ammusten magneettiset anomaliat.

4. ETSITTÄVIEN KOHTEIDEN ANOMALIAAT

4.1 LASKENNALLISESTI MÄÄRITETYT ANOMALIAAT

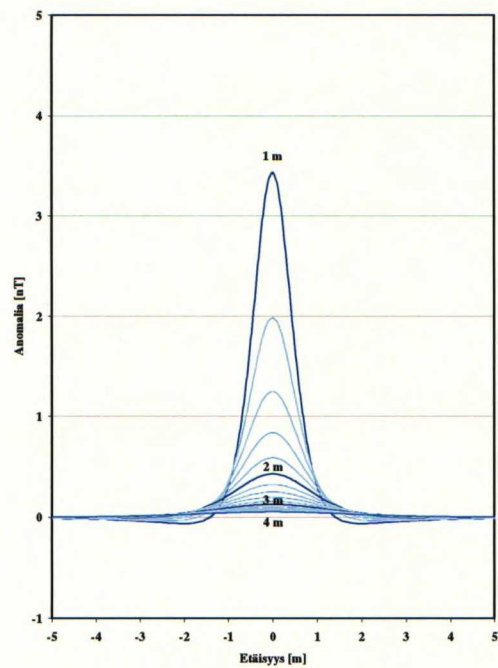
Käytännön anomaliaalaskuissa on tunnettava magneettikentän voimakkuus tutkimusalueella sekä ammusten dimensiot. Kokkolan alueella kentän voimakkuus on noin 41 A/m. Mallinnettavien ammusten dimensiot on esitetty taulukossa 3. Lentopommin kokonaispaino on 500 kg, josta ferromagneettista materiaalia on 250 kg. Taulukossa 4 on esitetty luvussa 3.3.2 kaavoilla 13 – 20 määritetyt arvot. Seuraavassa esitellään tarkemmin 37 mm ja 152 mm kranaattien sekä 500 kg lentopommin magneettisia anomalioita, jotka on laskettu eri mittausetäisyyksille. Laskennallisesti määritetyt anomaliat eri etäisyyksillä pysty- sekä vaaka-asentoisille 37 mm ja 152 mm kranaateille sekä 500 kg lentopommille on esitetty kuvissa 21 - 23.

Taulukko 3. 37 mm ja 152 mm kranaattien sekä 500 kg lentopommin dimensiot (Holma, Laitila 1999).

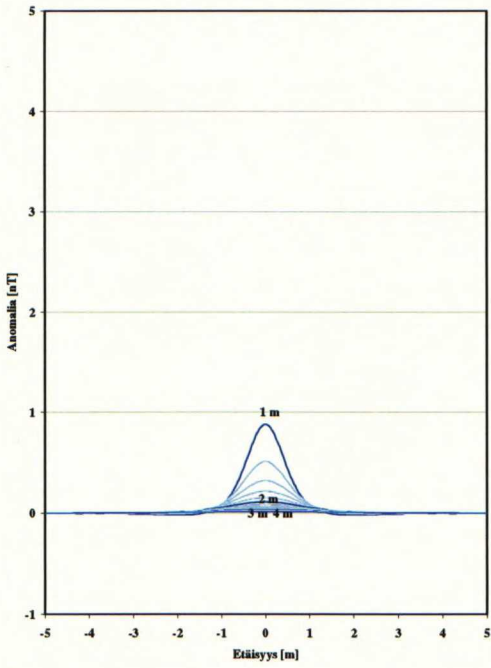
Ammuksen kaliiperi	Pituus (mm)	Halkaisija (mm)	Ferromagneettisen materiaalin massa (kg)	Kuoren paksuus (mm)
37 mm	107	37	0,60	7
152 mm	710	152	40	15
500 kg lentopommi	1350	460	250	25

Taulukko 4. 37 mm ja 152 mm kranaattien sekä 500 kg lentopommin laskennallisesti määritetyt demagnetoitumakertoimet (N_a ja N_b), magnetoitumat (m_a ja m_b) sekä normalisoidut magneettiset momentit ($m_{n/a}$ ja $m_{n/b}$) pituus- ja poikittaissuunnissa.

Ammuksen kaliiperi	N_a	N_b	m_a	m_b	$m_{n/a}$	$m_{n/b}$
37 mm	0,114	0,443	0,028	0,007	0,62	0,95
152 mm	0,061	0,469	5,747	0,750	0,3	0,92
500 kg lentopommi	0,098	0,451	69,500	15,109	0,3	0,85

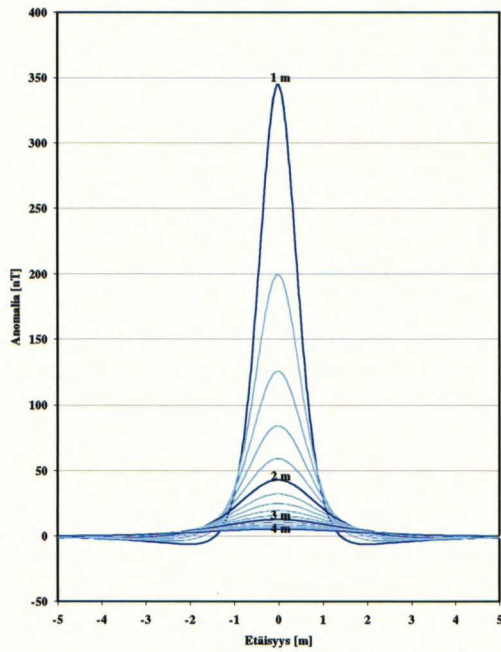


a)

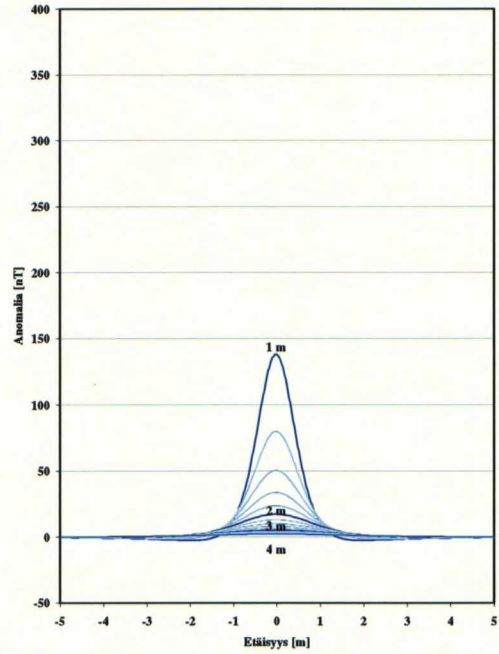


b)

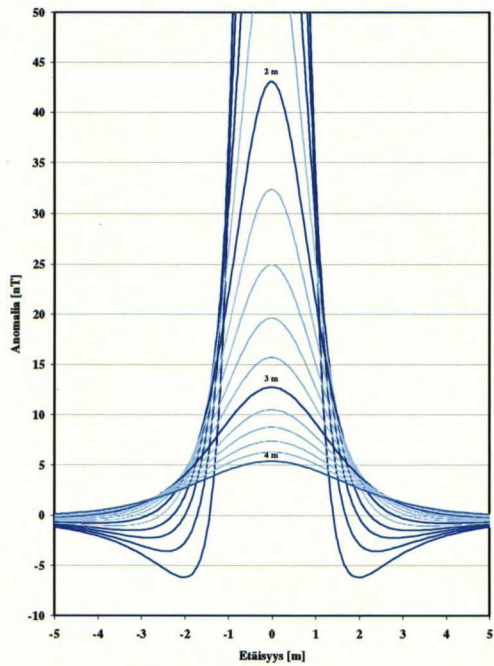
Kuva 21. a) Pystyasentoisen 37 mm kranaatin laskettu anomalia eri etäisyyksillä, b) Vaaka-asentoisen 37 mm kranaatin laskettu anomalia eri etäisyyksillä.



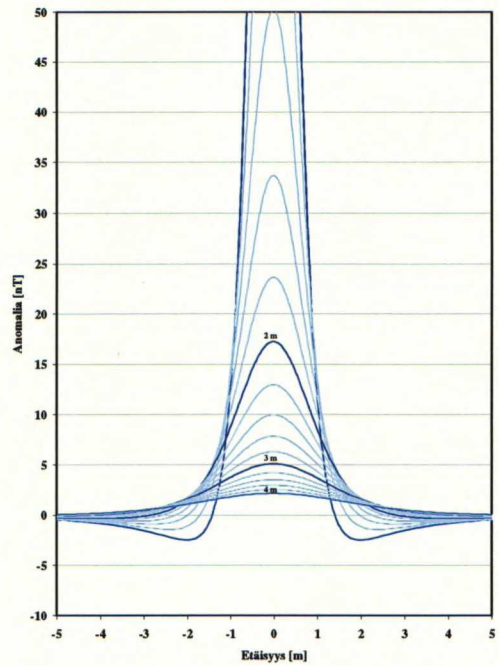
a)



b)

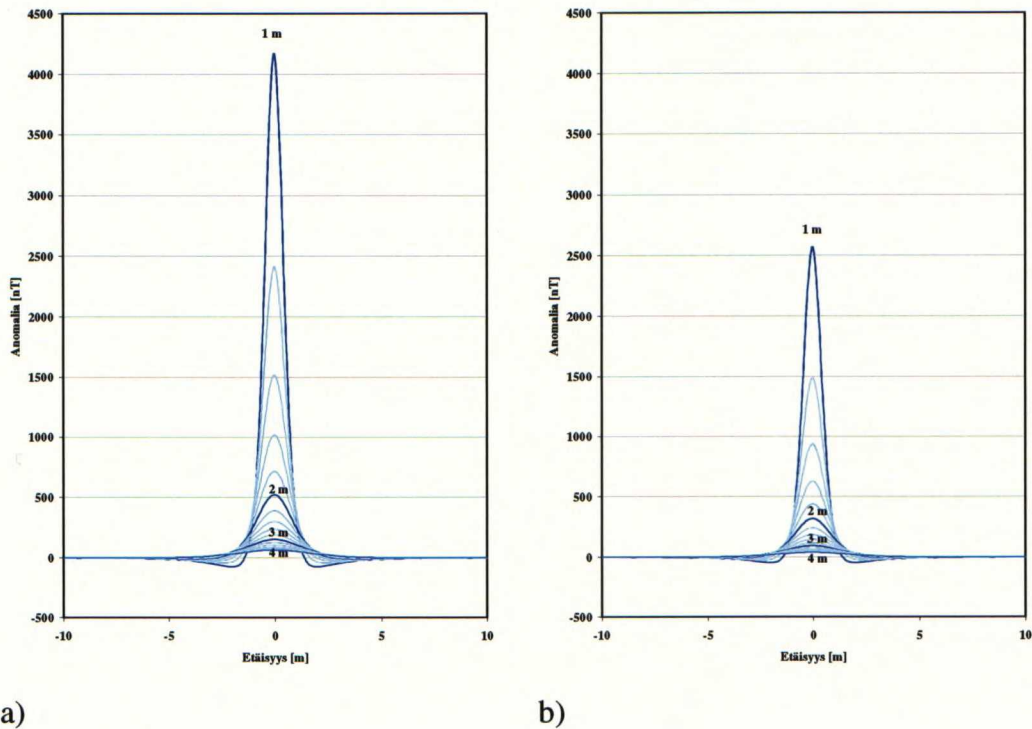


c)



d)

Kuva 22. a) ja c) Pystyasentoisen 152 mm kranaatin laskettu anomalia eri etäisyyksillä, b) ja d) Vaaka-asentoisen 152 mm kranaatin laskettu anomalia eri etäisyyksillä.



Kuva 23. a) Pystyasentoisen 500 kg lentopommin laskettu anomalia eri etäisyyksillä, b) Vaaka-asentoisen 500 kg lentopommin laskettu anomalia eri etäisyyksillä.

Todellisessa mittaustilanteessa etäisyys antureista etsittäviin kohteisiin oli keskimäärin 2 m. Tällä etäisyydellä pystyasentoisen 37 mm kranaatin laskennallinen anomalia on 0,4 nT ja vaaka-asentoisen 0,1 nT, 152 mm kranaatin laskennallinen pystyanomalia on 43 nT ja vaaka-anomalia 17 nT, pystyssä olevan lentopommin lasketun anomalian suuruus on 521 nT ja vaaka-asentoisen 321 nT.

Vaaka-asennossa 37 mm kranaatti aiheuttaa noin 25 % pienemmän anomalian kuin pystyssä, vaaka-asentoisen 152 mm kranaatin anomalia on 40 % pystyssä olevan kranaatin anomaliasta ja lentopommilla vaaka-anomalia on 62 % pystyanomaliasta. Kohteen asennon merkitys anomalian suuruudelle käy ilmi kuvista 20 – 22 erittäin havainnollisesti. Myös etäisyyden vaikutus näkyy.

4.2 TESTIMITTAUKSET KUIVALLA MAALLA

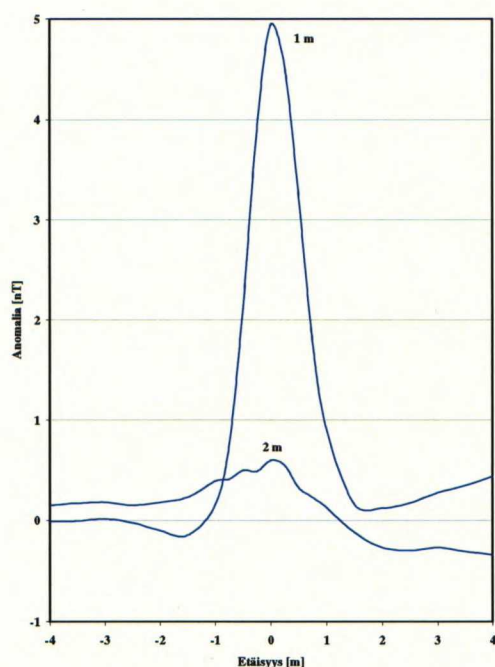
Mitatut anomaliat eri etäisyyksillä pysty- sekä vaaka-asentoisille 37 mm ja 152 mm kranaateille on esitetty kuvissa 24 ja 25. Magnetometrianhuri nostettiin 1 m, 2 m ja 3 m korkeudelle maasta. Kranaatteja siirrettiin anturin alapuolella ensin pysty- ja sitten vaaka-asennossa (linjan suunnassa) pohjois-etelä -suuntaista linjaa pitkin. Alle neljän metrin vaakaetäisyydellä anturista kranaattia siirrettiin linjaa pitkin 0,5 m välein ja kauempana 1,0 m välein. Taulukossa 5 on esitetty 37 mm ja 152 mm kranaatin pysty- ja vaaka-asennossa mitatut anomaliat eri etäisyyksillä.

Taulukko 5. 37 mm ja 152 mm kranaatin mitatut anomaliat pysty- ja vaaka-asennossa eri etäisyyksillä.

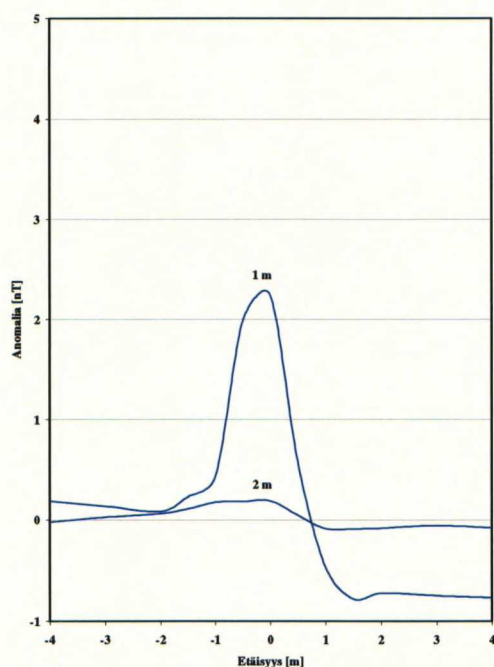
Kranaatin kaliiperi (mm)	Anturin korkeus (m)	Anomalia (nT)	
		pysty	vaaka
37	1	5	2,2
	2	0,6	0,2
152	1	3100	130
	2	200	20
	3	60	6

Yhden metrin etäisyydellä **37 mm kranaatti** aiheuttaa pystyssä 4,9 nT anomalian ja vaaka-asennossa 2,2 nT anomalian. Anturin ollessa kahden metrin korkeudella 37 mm kranaatin pystyanomalia on enää 0,6 nT ja vaaka-anomalia 0,2 nT. Metrin etäisyydellä vaaka-asennossa 37 mm kranaatti aiheuttaa noin 50 % pienemmän anomalian kuin pystyssä ja kahden metrin etäisyydellä vaaka-

anomalia on 30 % pystyanomaliasta. Pystyssä olevan 37 mm kranaatin anomalia pienenee teorian mukaisesti kahdeksasosaan kun etäisyys kaksinkertaistuu. Vaaka-asentoisen 37 mm kranaatin anomalia kahden metrin etäisyydellä on 8,5 % yhden metrin etäisyydellä mitatusta anomaliasta eli anomalia pienenee enemmän kuin teorian mukaisesti $1/8 = 12,5 \%$.



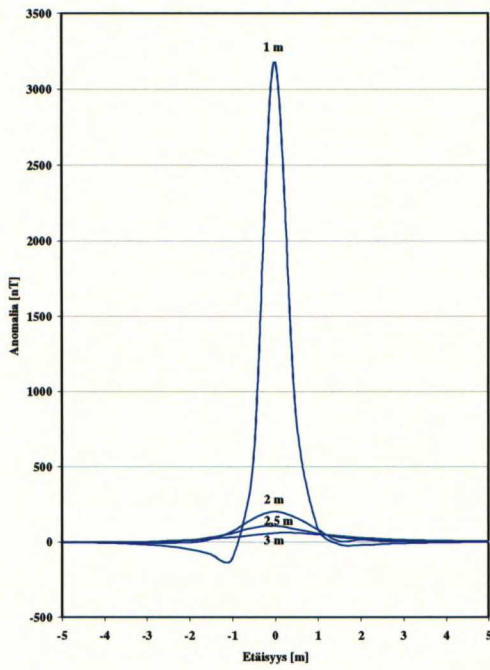
a)



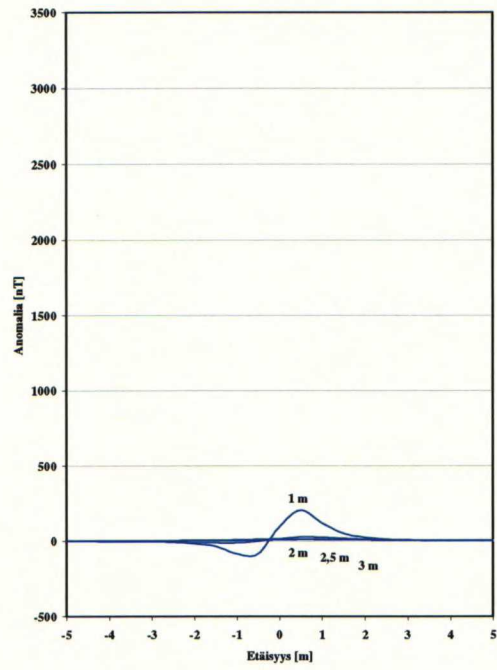
b)

Kuva 24. a) Pystyasentoisen 37 mm kranaatin mitattu anomalia 1 ja 2 m etäisyyksillä, b) Vaaka-asentoisen 37 mm kranaatin mitattu anomalia 1 ja 2 m etäisyyksillä.

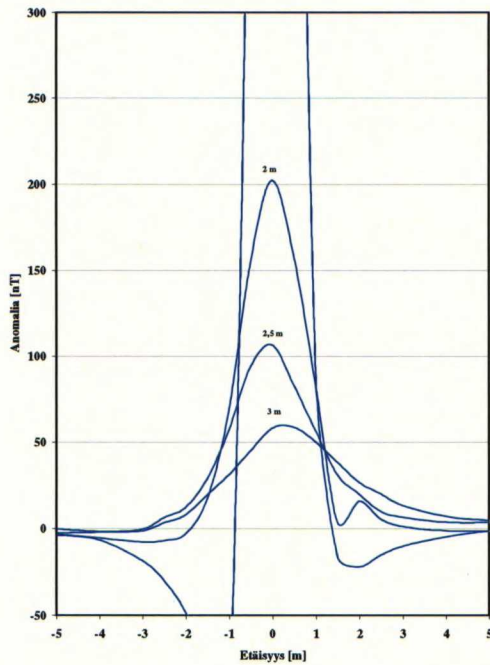
Anturin ollessa metrin korkeudella **152 mm kranaatti** aiheuttaa pystyssä yli 3100 nT anomalian ja vaaka-asennossa 130 nT anomalian. Kahden metrin etäisyydellä 152 mm kranaatin pystyanomalia on 200 nT ja vaaka-anomalia 20 nT. Kolmen metrin etäisyydellä pystyssä olevan 152 mm kranaatin anomalian suuruus on 60 nT ja vaaka-asennossa 6 nT.



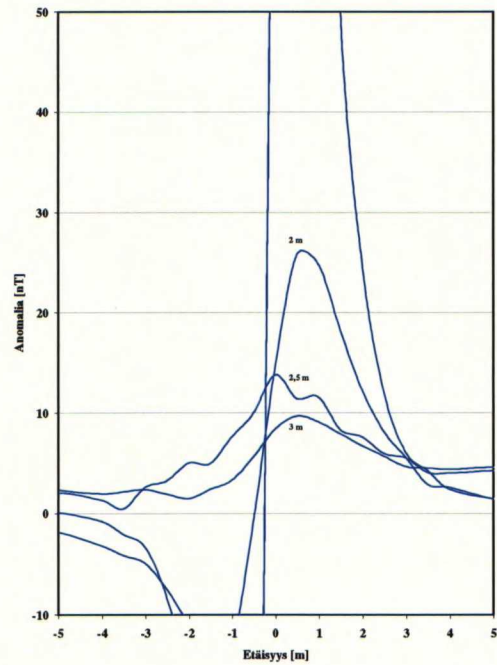
a)



b)



c)



d)

Kuva 25. a) ja c) Pystyasentoisen 152 mm kranaatin mitattu anomalia eri etäisyyksillä, b) ja d) Vaaka-asentoisen 152 mm kranaatin mitattu anomalia eri etäisyyksillä.

Anturin ollessa metrin korkeudella 152 mm kranaatin vaaka-asennossa mitattu anomalia on 4 % pystyasennossa mitatusta anomaliasta. Kahden metrin etäisyydellä mitattu vaaka-anomalia on 9,5 % ja kolmen metrin etäisyydellä 9,7 % pystyanomaliasta. Kahden metrin korkeudella mitatun pystyasentoisen 152 mm kranaatin anomalia on 6,4 % metrin korkeudella mitatusta arvosta.

Pystyasentoisen kranaatin anomalia pienenee huomattavasti voimakkaammin kuin teoria ennustaa. Vaaka-asentoisen 152 mm kranaatin anomalia kahden metrin etäisyydellä on 15 % yhden metrin etäisyydellä mitatusta anomaliasta. Vaaka-asentoisen 152 mm kranaatin anomalia pienenee melko hyvin teorian mukaisesti hieman yli kahdeksasosaan etäisyyden kaksinkertaistuessa.

4.3 POHDINNAT

Suomen leveysasteilla magneettikentän pystykomponentin suuruus on noin 95 % kokonaiskentästä, joten laskennallisesti määritetty pystykomponentti vastaa suuruusluokaltaan melko hyvin mitattua totaalikomponenttia. Määritettäessä anomaliaita laskennallisesti magnetoituman on oletettu koostuvan ainoastaan indusoituneesta magnetoitumasta. Lisäksi kohteiden muotoa on aproksimoitu ellipsoidilla ja susceptibiliteetista on esitetty vain suuruusluokka-arvioita. Koska todellista tilannetta on näin jouduttu yksinkertaistamaan, laskennallisesti saadut tulokset ovat vain suuntaa antavia eivätkä vastaa täysin todellisuutta.

Dipolimalli pätee hyvin, kun etäisyys mitattaviin kohteisiin on tarpeeksi suuri, kolminkertainen suurimpaan dimensioon nähden. Tämä selittää osaltaan laskettujen ja mitattujen anomalioiden suuria eroja pienillä havaintoetäisyyksillä.

Laskennalliset ja mitatut anomaliat eivät ole keskenään suoraan vertailukelpoisia, koska havaintoetäisyydet eivät täysin vastaa toisiaan. Kentällä tehdyissä testimittauksissa ilmoitettu etäisyys on magnetometrin korkeus maanpinnasta eikä etäisyys anturin ja kranaatin massakeskipisteen välillä. Suuremman 152 mm kranaatin pituus on 700 mm eli anturin ollessa metrin korkeudella etäisyys kranaatin keskipisteeseen on 0,65 m. Kranaatin massa keskittyy kuitenkin

alaosaan kannan ympärille. Mittausetäisyyden ollessa 0,65 m dipolimalli ei päde, vaan havaittu anomalia on huomattavasti dipolimallin ennustamaa suurempi.

Tarkastelluista ammuksista **37 mm kranaatille** asennon vaikutus on kaikkein kriittisin. On epätodennäköistä, että pystyasennossakaan olevaa yksittäistä 37 mm kranaattia havaitaan magneettisilla mittauksilla edes metrin etäisyydeltä. Vaaka-asennossa olevaa kranaattia on lähes mahdoton havaita metrin etäisyydeltä, suuremmilla etäisyyksillä yksittäinen kranaatti jää havaitsematta.

Kun havaintoetäisyys ylittää kolme metriä, yksittäistä vaaka-asentoista **152 mm kranaattia** ei välttämättä havaita. Yksittäisen pystyasentoisen 152 mm kranaatti havaitseminen on mahdollista vielä kolmen metrin etäisyydeltä.

Suurimmalla ammuksella eli **500 kg lentopommilla** asennon vaikutus anomalian suuruuteen ei ole yhtä kriittinen. Vaaka-asentoisen lentopommin laskennallinen anomalia on neljän metrin etäisyydellä vielä 40 nT. Näin suuri anomalia havaitaan käytännön mittausetäisyyksillä lähes poikkeuksetta. Todellisuudessa lentopommit makaavat pohjassa lähempänä vaaka-asentoa kuin pystyssä.

5. KÄYTÄNNÖN MITTAUKSET

5.1 LÄHTÖKOHDAT

Lähtökohtana koko mittaussysteemille oli mahdollisimman vähäinen magneettinen heräte. Rakentamisessa pyrittiin käyttämään epämagneettisia materiaaleja kuten puuta, alumiinia, messinkiä, muovia ja haponkestävää tai ruostumatonta terästä. Kyseessä oli pilottiprojekti, joka piti viedä läpi erittäin nopeasti, pienellä budjetilla ja vähäisin testimittauksin.

Alunperin tilaajan toivomuksena oli, että rakennettaisiin kevyt, perävaunulla helposti liikuteltava mittaussysteemi. Tällaista mittauslaitteistoa voitaisiin tulevaisuudessa käyttää sekä merellä, järvillä että sisälammilla tehtäviin ammusten paikannuksiin. Syksyllä 1999 Kokkolan syväväylän ammuspaikannusprojektin päätyttyä GTK kävikin etsimässä lentopommeja Kuopion Valkeisenlammesta. Tämä työ tehtiin GTK:n rakentamalla kuljetettavalla mittaussysteemillä.

Kokkolan tutkimusalue sijaitsi ulkomerellä, ja varsinkaan luoteistuulella magneettimittauksia ei voitu aallokon takia tehdä. GTK:n rakentama helposti kuljetettava mittaussysteemi osoittautui näihin ankariin olosuhteisiin hieman liian kevyeksi, varsinkin kun mittauksia oli tarkoitus jatkaa pitkälle syksyyn. Yhteistyöllä Pohjanlahden Merenkulkupiirin kanssa muutettiin alumiininen haralautta magneettisiin mittauksiin soveltuvaksi. Heti Merenkulkupiirin alumiinilautan muutostöiden valmistuttua magnetometrian turit siirrettiin siihen ja mittaukset vietiin loppuun alumiinilautalla.

5.2 TYÖN TURVALLISUUS

Väylälle upotettuja ammuksia ja ammuselementtejä oli kuljetettu Kokkolaan muualta Suomesta. Puutteellisten tietojen vuoksi ei voida varmuudella olettaa kaikkien ammusten olevan ilman sytyttimiä, mikä aiheuttaa huomattavan riskitekijän. Lisäksi joissakin vanhoissa räjähteissä on käytetty pikriinihappoa, joka meriveden kanssa reagoidessaan muodostaa hauraan ja erittäin herkästi räjähtävän yhdisteen. Kokkolan edustalla on upotettu mereen myös vaarallisia sytytinlaatikoita (kuva 26) (Maunula 1999). Turvallisuuksien vuoksi mittausjärjestelmästä kehitettiin sellainen, että pohjakosketusten mahdollisuus saatiin minimoitua.



Kuva 26. Meren pohjaan upotettu sytytinlaatikko (kuva ltn Lahtinen, Saaristomeren Meripuolustusalue, 1997).

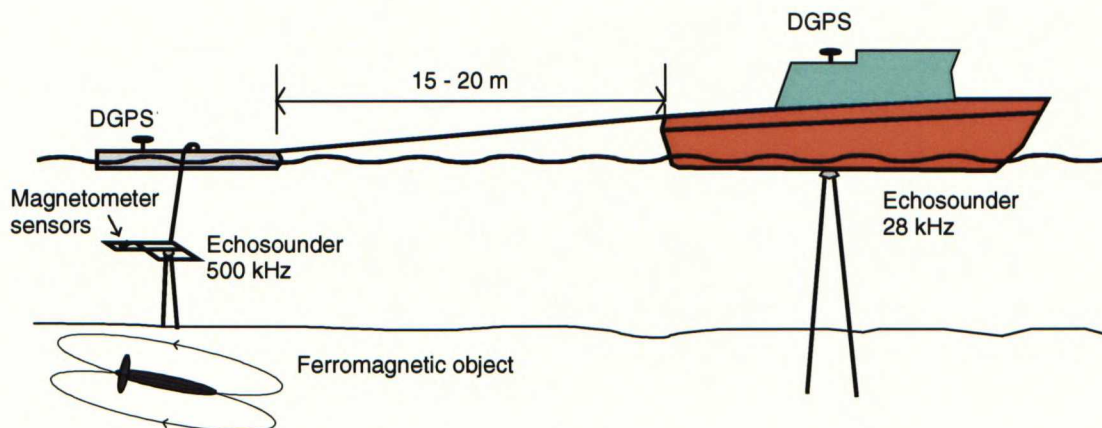
5.3 MITTAUSJÄRJESTELMÄ

Alkuperäinen GTK:n rakentama kuljetettava magneettinen mittausjärjestelmä on esitetty kuvassa 27. GTK:n tutkimusalus Kaita soveltuu hyvin magneettimittauksiin. Aluksen runkomateriaalina käytetty lasikuitu sekä vesisuihkupropulsiolaitteisto aiheuttavat erittäin vähän häiriöitä magnetometreihin. Tutkimusaluksen tekniset tiedot on koottu taulukkoon 6. T/A Kaidan magneettista herätettä ei ole mitattu. Alusta navigoitiin RDS-korjatulla (tarkkuus ± 2 m) DGPS-signaalilla. Tutkimusaluksen perässä hinattiin epämagneettista lautta noin 15 – 20 m päässä. Magnetometrian turit on kiinnitetty vedenalaiseen siipeen, jota hinataan lautan alapuolella 1 – 2 m etäisyydellä pohjasta. Lautan navigointiin sekä magneettisen datan paikannukseen käytettiin Kokkolan Ykspihlajan satamassa sijaitsevaa ruoppausurakoitsijan referenssiaseman lähettämää RTK-signaalia (Real Time Kinematic, tarkkuus desimetriluokkaa). Signaali vastaanotettiin reaaliajassa kaksitaajuus DGPS-laitteella. Varalla oli venäläinen GLONASS-satelliittipaikannusjärjestelmä.

Merenpohjan topografiaa seurataan mittauksen aikana 28 kHz:n tutkimuskaikuluotaimella, joka lävistää pehmeitä, postglasiaalisia pohjasedimenttejä. Kaikuluotaimen anturi sijaitsee aluksen keskivaiheilla. Näin saadaan tieto esim. pohjan madaltumisesta parikymmentä sekuntia ennen kuin pohjaa lähellä kulkevat anturit osuvat kohdalle. Anturien tasolle on asennettu 500 kHz kaikuluotain, jonka avulla seurataan anturien etäisyyttä pohjasta. Korkeataajuinen signaali ei läpäise pohjasedimenttejä vaan heijastuu takaisin jo pohjan pintakerroksesta. Anturin etäisyystieto pohjasta tallentuu samalla taajuudella kuin magnetometridata eli 10 kertaa sekunnissa. Mittausnopeus oli kaksi solmua eli noin 1 m/s. Kun näytteenottotaajuus oli 10 Hz, saatiin dataa linjan suunnassa 10 cm välein.

Tutkimusalueella paksujen sedimenttikerrosten peittämä meren pohja oli melko tasainen. Vuosikymmeniä sitten upotetut ammuksiset olivat myös luonnollisesti sedimentteihin hautautuneina. Magnetometrian turien etäisyyttä merenpohjasta ei

sedimentteihin hautautuneina. Magnetometrian turien etäisyyttä merenpohjasta ei voitu säätää mittauksen aikana. Olosuhteet olivatkin pohjan tasaisuudesta johtuen mittaussysteemille suosiolliset.



Kuva 27. Mittausjärjestelmä, GTK:n pieni lautta ja T/A Kaita

Taulukko 6. Tutkimusalus Kaidan tekniset tiedot

Pituus	12,7 m
Leveys	3,5 m
Syväys	0,9 m
Runkomateriaali	Lasikuitu
Propulsiolaitteisto	Hamilton vesisuihku, 2 kpl
Miehistö	2 – 6 henkilöä
Nopeus	Matkanopeus 10 solmua Luotausnopeus 2 solmua

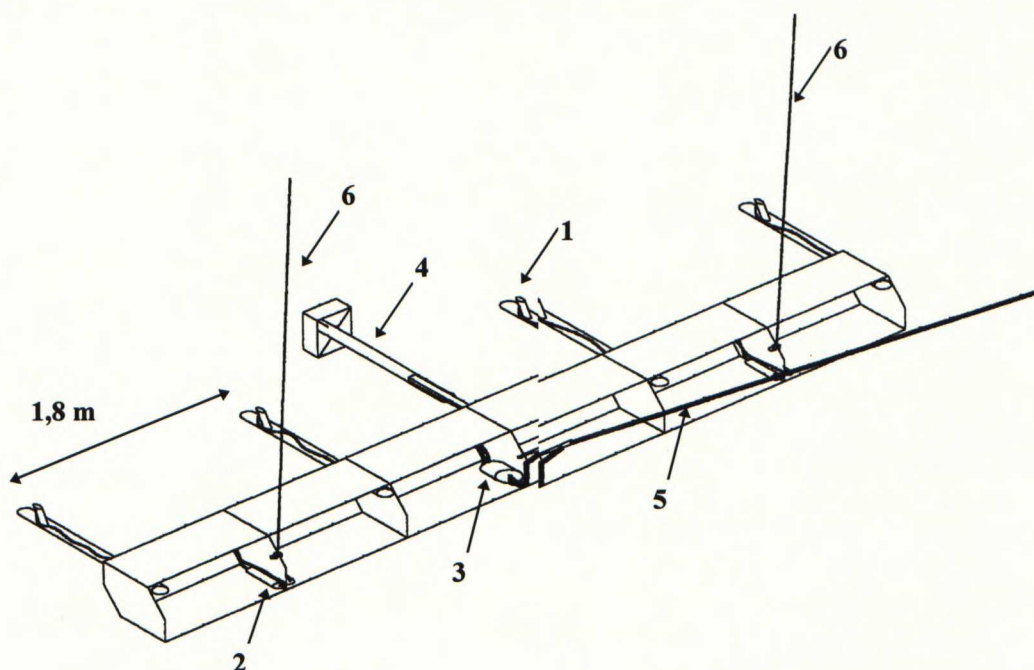
5.3.1 GTK:N MITTAUSLAUTTA

Epämagneettinen lautta koostuu kahdesta kolme metriä pitkstä ponttoonista, joiden päälle rakennettiin puusta ja alumiinista kolme metriä leveä työskentelytaso. Lautan alapuolelle on ripustettu ruostumattomien vaijerien varassa vedenalainen siipi. Siipeen on asennettu neljä totaalikenttää mittaavaa cesiumhöyrymagnetometria (Geometrics G-880) 1,8 m välein (kuva 28). Sivusuunnassa saavutettava peitto on 6,5 m leveä, joten koko tutkimusalue saatiin katettua viiden metrin linjavälein.

Siipi on valmistettu alumiinista. Kun antimagneettinen, mutta johtava alumiinisiipi liikkuu aallokossa, siihen indusoituu pyörrevirtoja. Siiven liikkuminen aallokossa näkyi selkeästi magnetometrian turien lukemissa. Anturit asennettiin muoviputkien avulla 1,2 m päähän siiven takareunasta, jotta syntyneet häiritsevät pyörrevirtaefektit saatiin mahdollisimman pieniksi.

Siipi voidaan asentaa sellaiseen kulmaan veteen nähden, että vedossa ollessaan se pyrkii sukeltamaan syvemmälle. Näin estetään siiven nouseminen pintaa kohden ja samanaikainen linjan suuntainen siirtyminen taaksepäin. Siipi ei kuitenkaan sijaitse aivan suoraan DGPS-anturin alla, vaan muutaman metrin verran taaempaan. Tämä etäisyys voidaan määrittää helposti ajamalla tietyn kohteen yli vastakkaisiin suuntiin ja vertaamalla mittaustuloksia. Linjan suuntainen viive eli lag korjataan magneettisen datan tulkintaohjelmalla, ks luku 7.2.

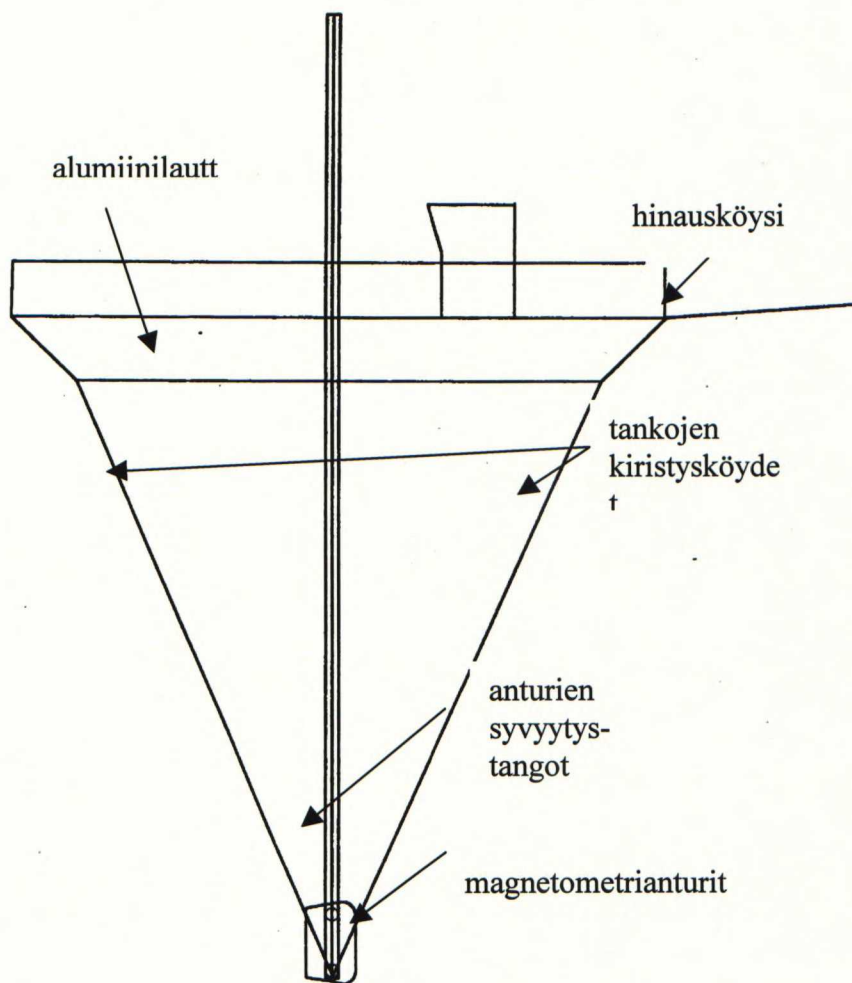
Siipeä pyritään hinaamaan mahdollisimman lähellä merenpohjaa osumatta siihen. Siipeä ei voi syvyttää (säätää sen etäisyyttä pohjaan) reaaliajassa pohjan syvyyden mukaan. Sähköisiä vinssejä ei voitu käyttää, koska ne olisivat häirinneet antureita. Siiven syvyttäminen tapahtuu lautalla, jossa yksi ihminen vinssaa käsivinsillä vaijereita ylös ja alas. Käytännössä siipi syvytetään noin 1 – 2 m päähän pohjasta ja mitataan koko kyseisen syvyinen tutkimusalue näillä säädöillä. Kun syvyys muuttuu, joudutaan siipi syvyttämään uudestaan.



Kuva 28. Vedenalainen syvyytettävä alumiinisiipi, 1. magnetometriananturi, 2. etuvahvistin, 3. tehonsyöttö- ja kytkentäyksikkö sekä 500 kHz kaikuluotain, 4. syvyytyksen säätöperäsin, 5. data- ja vetokaapeli, 6. syvyytysvaijerit.

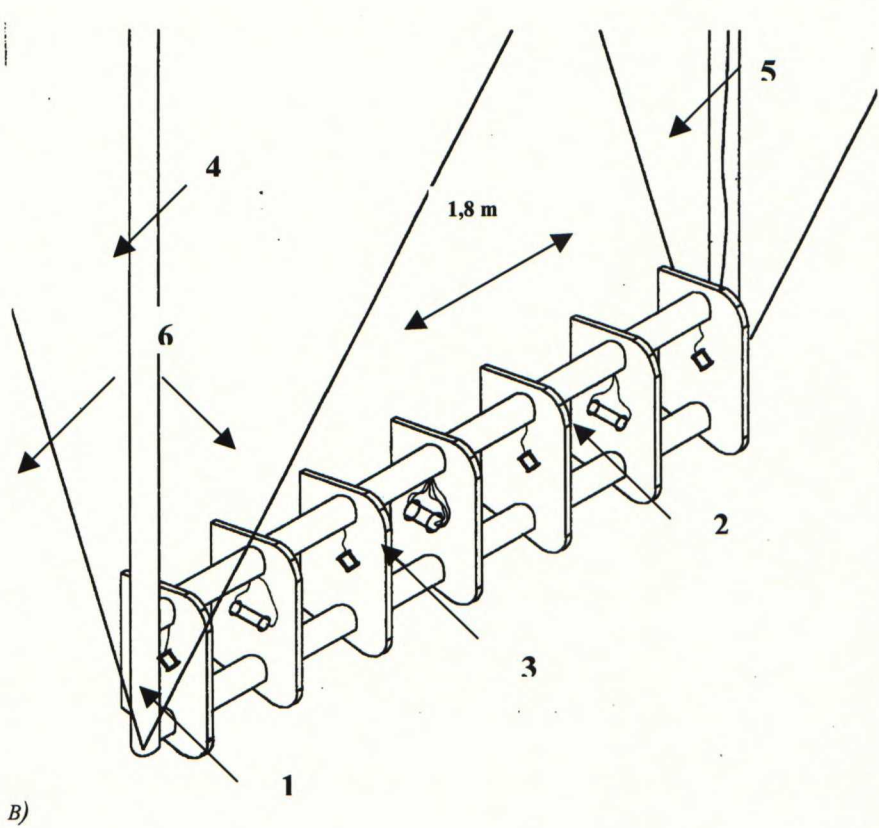
5.3.2 MERENKULKUPIIRIN HARALAUTTA

Kokkolan tutkimusalue sijaitsi ulkomerellä, jossa tuuli nostatti helposti mittaustoimintaa häiritsevän aallokon. GTK:n rakentamalla kevyellä mittaussysteemillä (pieni lautta ja siipi) ei magneettisia mittauksia voitu tehdä kuin lähes tyynellä säällä. Mittauksia oli tarkoitus jatkaa pitkälle syksyyn, joten Pohjanlahden Merenkulkupiirin vankkarakenteisempi alumiininen haralautta muutettiin magneettisiin mittauksiin soveltuvaksi. Anturit kiinnitettiin vaakatasossa olevaan rakenteeseen, jota syvytettiin tangoilla (kuva 29). Lautan ferromagneettiset osat purettiin pois ja korvattiin epämagneettisilla materiaaleilla kuten puulla ja alumiinilla. Lauttaa hinattiin edelleen T/A Kaidalla.



A)

Kuva 29 a) Merenkulkupiirin alumiininen haralautta sivulta



Kuva 29 b) Yksityiskohtainen kuva vedenalaisesta anturiyksiköstä, 1. magnetometrianhuri, 2. etuvahvistin, 3. tehosyöttö- ja kytkentäyksikkö sekä 500 kHz kaikuluotain, 4. syvyystanko, 5. datakaapeli, 6. syvyystangon kiristysköydet.

5.3.3 MITTAUSSYSTEEMIEN VERTAILU

GTK:n pienen lautan maksimihinausnopeus on sama kuin luotausnopeus eli kaksi solmua. Isoa alumiinilauttaa voitiin hinata neljän solmun nopeudella, joten siirtoajoista selvittiin nopeammin kuin pienen lautan kanssa. Matka satamasta työalueelle oli kuitenkin sen verran pitkä, että ajan säästämiseksi kumpaakaan lautta ei hinattu joka kerta satamaan asti. Lautta jätettiin lähelle työaluetta aallonmurtajan suojaan poijuun, josta se käytiin hakemassa matkalla työalueelle. Isomman alumiinilautan manöveeraaminen satama-altaassa kumiveneellä oli huomattavasti hankalampaa kuin pienen lautan siirtely.

Magneettimittauksissa säävaatimus on tiukka. Jo vähäinen aallokko näkyy mittaustuloksissa. Välillä tallennus oli päällä vain myötääallokossa, kun vastaaallokossa lautta keinui liikaa. Merenkulkupiirin haralautalla voitiin mittauksia jatkaa kovemmassa tuulella ja aallokossa kuin GTK:n kevyemmällä lautalla. Isolla lautalla työolosuhteet olivat paremmat. Pienellä lautalla työskentely oli kosteaa, mm. siipeä syvytetessä paras asu oli lämpötilan mukaan joko uima- tai kuivapuku. Kelin muuttuessa kovemmaksi oli erittäin vaikeaa saada anturisiipi vinssattua ylös ja ottaa lautta hinaukseen.

Alumiinilautan syvyttäminen vaati GTK:n pieneen lauttaan verrattuna huomattavasti enemmän aikaa ja yhden lauttahenkilön lisää. Alumiinilautan aisojen oikeasta asennosta ei saatu aina täyttä varmuutta. Pystysuorien syvytysaisojen vedenalaiset osat jäivät helposti vinoon. Pohjakosketusten jälkeen aisojen uudelleensyvytyksellä vei paljon aikaa. GTK:n pienen lautan suurin epävarmuustekijä liittyi vaijereilla ripustetun siiven paikkaan lautan ja DGPS-antennin alla. Edellä mainittu linjan suuntainen siirtymä voidaan määrittää yksinkertaisesti ajamalla tietyn kohteen yli vastakkaisiin suuntiin ja vertaamalla mittaustuloksia. Sen sijaan esim. vedenalaisen virtauksen aiheuttama siiven siirtyminen sivusuunnassa koko mittauslinjan matkalla on vaikeampi todentaa. Siiven hydrodynaamisen profiilin suunnitteli asiaan perehtynyt konsulttiyhtiö. Siiven linjan aikainen ylös-alas heiluminen tai edestakainen sivuttaisliike on pyritty saamaan mahdollisimman pieneksi juuri profiilin muodolla.



a)



b)

Kuva 30. GTK:n pieni kuljetettava mittauslautta a) sivulta ja b) edestä.



Kuva 31. Merenkulkupiirin alumiinilautta ja tutkimusalus Kaita.

5.4 AJOLINJAOHJELMISTO

Mittausten suunnittelu, reaaliaikainen seuranta sekä ajettujen linjojen tallennus tapahtuu Meridata Oy:n MDCS merenmittausohjelmistolla. MDCS-mittausohjelmiston käyttöympäristönä on T/A Kaidalla Windows NT-käyttöjärjestelmällä varustettu Pentium-mikrotietokone. Ajolinjaohjelmistoon liitettiin lautan paikannuslaitteisto. Suuntatieto laskettiin lautan DGPS:n avulla.

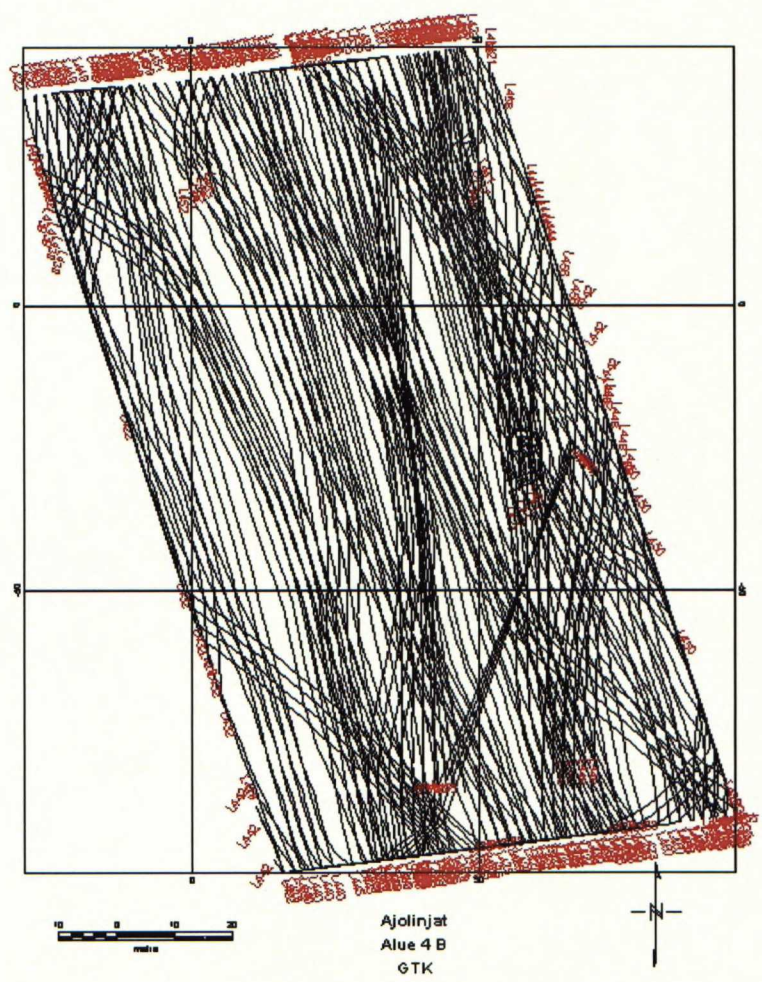
Mittauksen suunnittelu tapahtuu karttakäyttöliittymässä, joka perustuu suorakulmaiseen tasokoordinaatistoon. Suunnitelmaan voidaan määritellä yksi tai useampi tutkimusalue kerrallaan tai ajolinjat yksi kerrallaan tai ryhminä, mittauslinjojen väli ja yhdellä ajolla saavutettava sivuttaispeitto. Käytännössä osoittautui hyväksi jakaa isompi tutkimusalue pienempiin osiin, jotka pyrittiin ajamaan yksi kerrallaan. Ajettu reitti ja saavutettu mittauspeitto tallentuu, joten koko ajan ollaan selvillä missä on ajettu ja missä on vielä paikattavaa (kuva 32).

T/A Kaidan kuljettajalla oli kahdesta paikannuslaiteesta seurattavana itse aluksen paikka sekä perässä hinattavan lautan paikka. Alusta pyrittiin ohjaamaan siten, että perässä hinattu lautta olisi kulkenut mahdollisimman tarkasti suunniteltuja ajolinjoja pitkin.

Raskas lautta kulki helposti omia menojaan aluksen perässä. T/A Kaidan navigointi siten, että 20 m päässä perässä hinattu lautta olisi kulkenut viiden metrin linjavälein, oli erittäin haastava tehtävä. Meridata Oy:n ajolinjaohjelmisto osoittautui korvaamattomaksi ajettaessa näin tiheää linjastoa. Tuuli ja merivirrät pyrkivät aina tietyissä kohdin tarttumaan perässä hinattavaan lauttaan ja poikkeuttamaan sen kurssilta. Myös GTK:n pienen lautan kanssa esiintyi sama ongelma eli perässä hinattava lautta poikkesi helposti suoralta kurssilta. Tavallisesti jouduttiin ajamaan kolminkertainen määrä linjoja, jotta koko alueelle saatiin kattava peitto (kuva 33).



Kuva 32. Meridata Oy:n merenmittausohjelmisto (www.meridata.fi/mdcs.html).



Kuva 33. Todellisen mittaus tilanteen ajolinjat.

5.5 MAGNEETTISIA MITTAUKSIA TUKEVAT MUUT MENETELMÄT

5.5.1 PINGER-TUTKIMUSKAIKULUOTAIN

T/A Kaidalla olevalla 28 kHz tutkimuskaikuluotaimella voitiin pohjan muodot ennakoida noin 20 – 25 m ennen perässä hinattavia magnetometriantureita. Vaikka magnetometrianturien reaaliaikainen syvyytys ei ollut mahdollista, antoi tutkimuskaikuluotain arvokasta informaatiota. Kaikuluotaintiedon avulla vältyttiin lukuisilta pohjakosketuksilta ja havaittiin selkeästi missä päin tutkimusaluetta oli ruopattua merenpohjaa sekä missä kallioperä nousee esiin sedimenttien alta.

Tutkimuskaikuluotaimen ja magnetometrianturien informaatio ei ollut aivan sopusoinnussa keskenään. Välillä kaikuluotaimen profiililla näkyi kohde, josta tuli voimakas kaiku, mutta johon magnetometri ei reagoinut mitenkään. Yleensä kaikuluotaimella ei voitu havaita mitään silloin, kun magnetometreillä löytyi selviä ferromagneettisia kohteita.

Tulevaisuudessa magnetometrien reaaliaikainen syvyyttäminen voisi olla mahdollista tutkimuskaikuluotaimen avulla. Tämä vaatii kuitenkin vielä jonkin verran kehittelyä.

5.5.2 VIISTOKAIKULUOTAIN

Viistokaikuluotaimella saadaan ilmakehuun verrattavissa oleva akustinen kuva merenpohjasta. Vertaamaalla magneettisia havaintoja viistokaikuluotaimen kuvaan voitaisiin magneettisia havaintoja poistaa, mikäli viistokaikuluotaimen kuvasta löytyisi järkevä syy magneettiselle anomalialle, esim. ankkuri tms. Viistokaikuluotaimen hyödyntäminen edellyttää kovaa pohjaa, josta kohteet erottuvat hyvin, sekä tarkkaa paikannusmenetelmää. Viistokaikuluotainta ei voitu kiinnittää samaan rakennelmaan magnetometrien kanssa, koska se aiheutti magnetometreihin liikaa häiriöitä.

Viistokaikuluotaimen käyttö on kuitenkin suositeltavaa tutkimusalueen alustavassa kartoituksessa. Tällöin selviää helposti ja nopeasti alueen geologinen rakenne, kalliopaljastumat sekä mahdolliset kaapelit yms. ihmisen rakentamat kohteet pohjassa. Myös pohjan ruoppausjäljet näkyvät viistokaikuluotaimen kuvasta selvästi. Koska magneettikenttä vaimenee nopeasti etäisyyden kasvaessa on tärkeää tietää esim. ruoppauksesta aiheutuva pohjan muotojen vaihtelu. Tässä viistokaikuluotaus ja tavallinen kaikuluotaus ovat käytännöllisiä menetelmiä.

Kokkolan ammusmittausten yhteydessä viistokaikuluotaus ei osoittautunut kovinkaan hyödylliseksi. Tutkittavan alueen pohja oli pehmeiden savikerrosten peitossa, joten kaikki etsittävät kohteet olivat hautautuneet näkymättömiin. Viistokaikuluotainkuvassa ei näkynyt mitään suurten magneettisten anomalioiden kohdalla. Tästä johtuen viistokaikuluotaimen perusteella ei voitu poistaa havaintoja. Geologian tutkimuskeskuksen viistokaikuluotaimen paikannustarkkuus ei myöskään ollut riittävä ammustutkimuksiin.

5.5.3 SUKELLUSTUTKIMUKSET

Sukeltajat voivat tarkastaa havaittuja magneettisia anomaliaita paikan päällä. Tässä tapauksessa olosuhteille on samat vaatimukset kuin viistokaikuluotauksessa eli pohja ei saa olla liian pehmeä. Pehmeisiin pohjasedimentteihin voi hautautua isojaakin ammuksia, joista sukeltaja ei näe jälkeäkään.

Kokkolassa puolustusvoimien sukeltajat kävivät pohjassa tarkastamassa havaittuja useiden satojen nanoteslojen anomaliaita löytämättä kuitenkaan mitään. Sukellusraportissa kerrottiin vain useiden kymmenien senttimetrien paksuisista pehmeistä pohjakerrostumista, joiden sisällä voi hyvin olla vaikka lentopommeja. Pohjaan hautautuneiden kohteiden paikallistamisessa sukeltajan mukanaan kuljettamasta käsिमagnetometrasta voisi olla lisäapua. Epätarkkuutta voivat kuitenkin aiheuttaa normaalin sukelluslaitteiston ferromagneettiset osat. Raivaajasukeltajien antimagneettinen varustus soveltuisikin parhaiten käsिमagnetometritutkimuksiin.

6. GEOSOFT *UX-DETECT* -OHJELMA

Magneettisia mittaustuloksia käsiteltäessä tavoitteena on pelkistää alkuperäistä monimutkaista informaatiota. Suuria datamääriä käsiteltäessä tarvitaan automaattista tulkintaa. Magneettikentän totaalikartasta on usein vaikea poimia tai erottaa pieniä kohteita luotettavasti. Geosoftin *UX-Detect* -ohjelma määrittää magneettisten kohteiden sijainnin tasossa magneettikentästä lasketun analyttisen kolmiulotteisen signaalin avulla ja laskee lähteiden näennäisen syvyyden Eulerin dekonvoluutiolla. Analyttinen signaali pyrkii paljastamaan selvästi erilaiset magnetoitumakontrastit riippumatta ulkoisesta magneettikentästä tai kohteen magnetoituman suunnasta. Minkäänlaista geologista mallia kohteista ei tarvita eli Maan magneettikentän suuntaa tai kohteiden remanenssia ei tarvitse huomioida. (Spurgeon et al. 1998) Englannin kielisessä kirjallisuudessa usein käytetty lyhenne UXO tulee sanoista UneXploded Ordnance ja tarkoittaa räjähtämätöntä ammusastetta.

6.1 ANALYTTINEN SIGNAALI

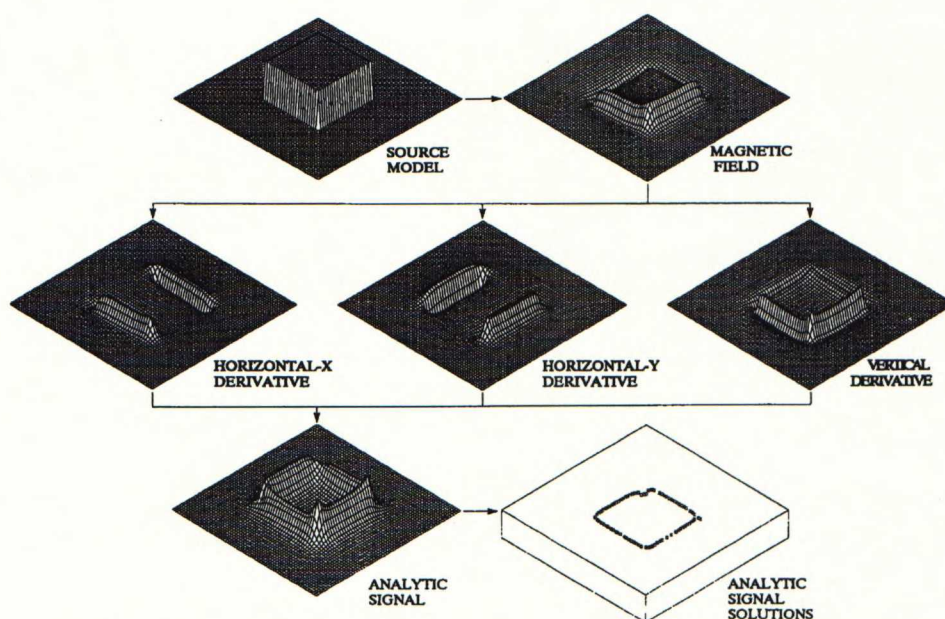
Analyttisellä signaalilla (gradientin itseisarvolla) lasketaan derivaatat eli kentän muutokset kolmessa toisiaan vastaan kohtisuorassa olevassa suunnassa seuraavasti (Spurgeon et al. 1998)

$$|A(x, y)| = \sqrt{\left(\frac{\partial B}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial B}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial B}{\partial z}\right)^2} \quad (21)$$

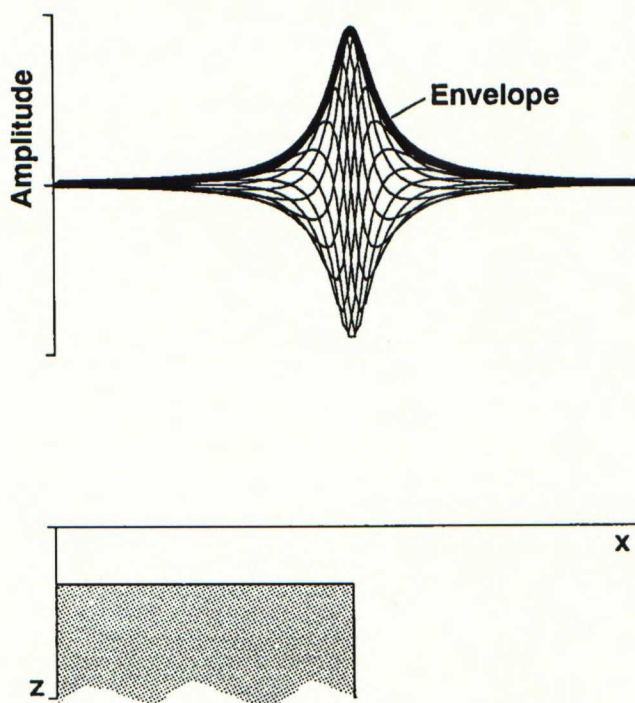
missä $A(x, y)$ on analyttisen signaalin amplitudi kohdassa (x, y) ja B on havaittu magneettikenttä kohdassa (x, y) . Totaalikentän hilasta määritetään analyttinen

kolmiulotteiden signaali laskemalla horisontaaligradientit (x,y) 3×3 konvoluutiofiltterillä ja vertikaaligradientti (z) nopealla Fourier-muunnoksella (FFT). (Spurgeon et al. 1998)

Analyttinen signaali paljastaa eri magnetoituman omaavien kappaleiden väliset rajapinnat riippumatta ulkoisesta magneettikentästä tai kappaleiden magnetoituman suunnasta, kuva 34 havainnollistaa tätä. (Roest et al. 1992) Ammuksia etsittäessä onkin usein vaikeaa tai täysin mahdotonta arvioida kohteiden pysyvää magnetoitumaa. Analyttisen signaalin absoluuttiarvoa kutsutaan usein signaalin energiataskuksi. Signaalin maksimiarvo paljastaa magneettisen rajapinnan sijainnin (kuva 35) (Roest et al. 1992).



Kuva 34. Analyttisen signaalin periaate (Roest et al. 1992).

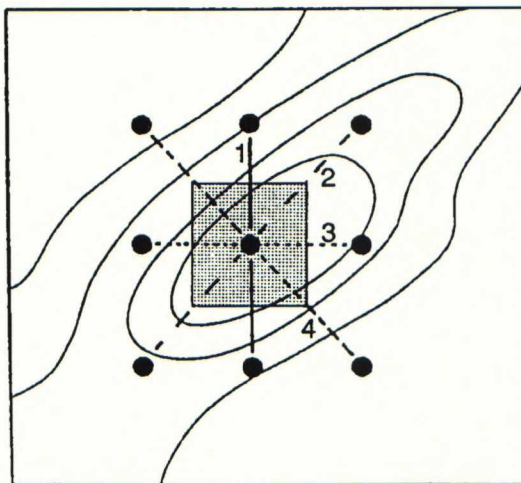


Kuva 35. *Analyttisen signaalin absoluuttiarvo eli signaalin energiatasku paljastaa magneettisen rajapinnan (Roest et al. 1992).*

6.2 BLAKELYN ALGORITMI

Analyttisen signaalin laskennan jälkeen *UX-Detect* -ohjelma poimii Blakely-algoritmin avulla analyttisen signaalin gridistä maksimiarvot, jotka indikoivat ympäristöstä poikkeavia magneettisia ominaisuuksia. Tämä tapahtuu vertaamalla tutkittavan solun arvoa sitä ympäröivien solujen arvoihin neljässä eri suunnassa 3x3 solun ikkunassa kuvan 36 mukaisesti. Algoritmi sovittaa paraabelin kolmen pisteen kautta kaikissa neljässä suunnassa. Paraabelin maksimi hyväksytään kohteeksi, mikäli se sijaitsee keskimmäisen solun alueella ja eroaa vierekkäisten solujen arvoista. Algoritmin indeksi kuvaa montako maksimia löytyy 3x3 solun ikkunasta. Indeksi kuvaa näin ollen myös anomalian maksimin lineaarisuutta. Jos indeksi on 4, kyseessä on paikallinen maksimi eli kaikissa neljässä suunnassa paraabelin huippu osuu keskimmäisen solun alueelle. Indekseillä 2 ja 3 löytyy enemmän maksimeja kuin indeksiarvolla 4. Lineaarilla anomaliolla indeksi on 1 eli paraabelin maksimi löytyy vain yhdessä neljästä suunnasta. (Roest et al.

1992) Ammuksista aiheutuvat anomaliat ovat paikallisia maksimeja eli indeksiltään 4 tai 3. Pitkänomaiset juonteet, putket ja sähköjohdot taas vastaavat hyvin indeksiä 1.



Kuva 36. Blakelyn algoritmin avulla etsitään maksimiarvoa vertaamalla keskimmäisen solun arvoa vierekkäisiin soluihin neljässä eri suunnassa (Blakely et Simpson 1986).

6.3 EULERIN DEKONVOLUTION

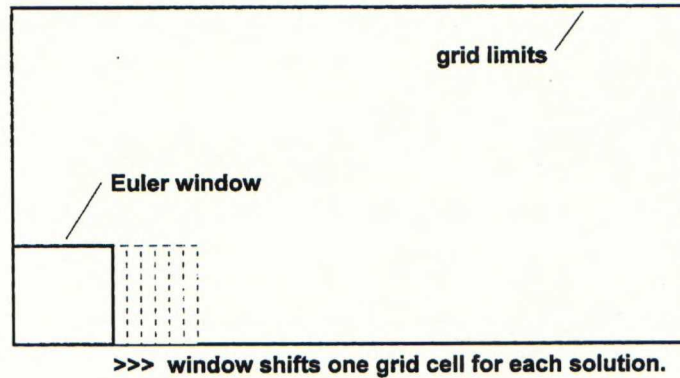
Eulerin dekonvoluutiolla määritetään magneettisen kohteen näennäinen syvyys

$$(x - x_0) \frac{\partial B}{\partial x} + (y - y_0) \frac{\partial B}{\partial y} + (z - z_0) \frac{\partial B}{\partial z} = n(B_0 - B) \quad (22)$$

missä (x_0, y_0, z_0) on magneettisen lähteen sijanti, B magneettisen lähteen pisteeseen (x, y, z) aiheuttama anomalia, B_0 on ulkoinen magneettikenttä ja n on ns. rakenneindeksi, joka ilmaisee lähteen vaimenemisen etäisyyden funktiona ja riippuu lähteen geometriasta, vrt. luku 3.3.1 (Spurgeon et al. 1998). Dipolilähteen kenttä vaimenee etäisyyden funktiona $1/r^3$, joten dipolin rakenneindeksi on 3. Viivalähteen kenttä vaimenee $1/r^2$ ja rakenneindeksi on näin 2. Väärä rakenneindeksin valinta johtaa epätarkkoihin paikkakoordinaatteihin ja vääristyneisiin syvyysarvioihin. Liian alhainen indeksi antaa liian pienen syvyysarvion ja liian korkea indeksi johtaa liian suuriin syvyysarvioihin.

Kohteiden syvyysarviot ovat joka tapauksessa tarkempia korkeiden kuin matalien indeksien yhteydessä. (Reid et al. 1990) Ammuksille on käytetty indeksiarvoja 2,7 ja 3 (Spurgeon et al. 1998).

Eulerin dekonvoluutio edellyttää oikean rakenneindeksin n valintaa. Tämän jälkeen ratkaistaan pienimmän neliösumman inversiolla (least-squares inversion) optimaaliset arvot x_0 , y_0 , z_0 ja B_0 . Laskentaikkuna liikkuu koko hilan läpi ja laskee ratkaisun jokaiselle solulle (kuva 37). Ikkunan tulee olla riittävän suuri, jotta anomaliat mahtuvat yhteen ikkunaan. Ikkuna ei saa kuitenkaan olla niin suuri, että mukaan tulee viereisiä anomalioita. Yleensä hyvä laskentaikkunan koko on suuruudeltaan 10x10 solua. (Yaghoobian et al.1993)



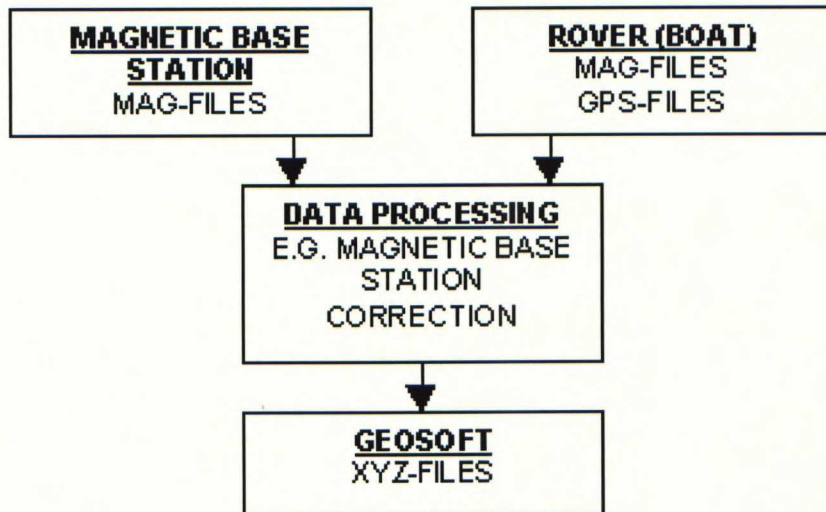
Kuva 37. Eulerin laskentaikkuna liikkuu hilan läpi ja laskee ratkaisun jokaiselle solulle (Yaghoobian et al.1993).

7. TULOSKÄSITTELY JA TULKINTA

7.1 ALKUKÄSITTELY

Mittaustulosten käsittelyprosessi käy ilmi kaaviosta kuvasta 38. Tutkimusaluksella tallennetaan magnetometrien lukemat 10 kertaa sekunnissa sekä paikkatieto kerran sekunnissa. Maan magneettikentän ajalliset vaihtelut rekisteröidään maissa magneettisesti häiriöttömällä alueella olevalla referenssimagnetometrillä eli ns. maa-asemalla. Mittausten jälkeen magneettisen maa-aseman rekisteröinti tarkastettiin ja tarvittaessa suodatettiin. Tiedostot yhdistetään tulosten alkukäsittelyohjelmilla, jotka sisältävät mm. koordinaattimuutokset WGS84-järjestelmästä Suomen KKJ-järjestelmään, ja tuloksena saadaan Geosoft *Oasis Montaj* -tulkintaohjelman formaattia olevat magneettiset xyz-tiedostot.

Maalla sijaitsevaa magneettista referenssiasemaa käytettiin myös Maan magneettikentässä tapahtuvien ajallisten vaihteluiden seuraamiseen. Näin havaittiin magneettiset myrskyt, joiden ajaksi mittaukset keskeytettiin. Koska etsittyjen kohteiden anomaliat olivat aallonpituudeltaan lyhyitä ja taajuudeltaan korkeita, voitiin magneettikentälle sallia hieman perinteisiä lentogeofysikaalisia mittauksia suurempi vaihtelu. Sallitut Maan magneettikentän maksimivaihtelut geofysikaalisissa lentomittauksissa ovat 50 nT/h, 20 nT/10 min ja 10 nT/3 min. Ammusten magneettimittauksissa aluksen etenemisnopeus on huomattavasti pienempi kuin lentokoneen, joten mittausten aikana voidaan sallia suuremmat Maan kentän vaihtelut.



Kuva 38. Mittaustulosten käsittelykaavio.

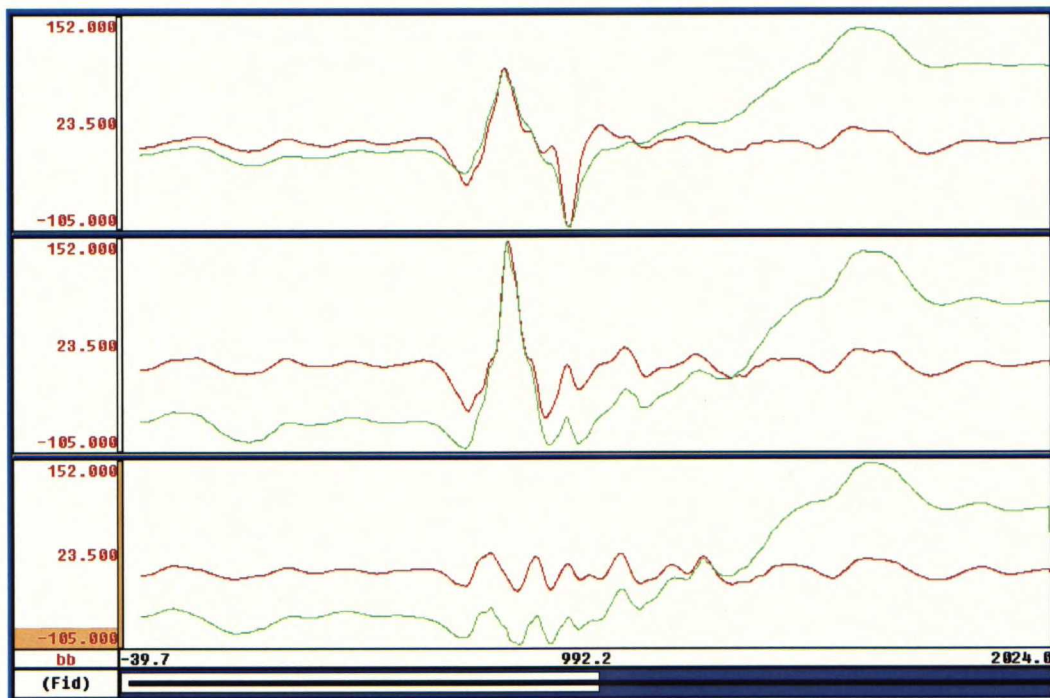
7.2 JATKOKÄSITTELY JA TULKINTA

Magneettisten mittaustulosten jatkokäsittely ja tulkinta tehdään Geosoftin *Oasis Montaj* - ohjelmalla. Lopullinen ammusten näennäisen koon ja hautautumissyvyyden määrittäminen tapahtuu Geosoftin *UX-Detect* - ammussovellusohjelmalla. Mittaustulosten linjan suuntainen vakiopaikannusvirhe eli lag korjataan *UX-Detect* -sovelluksessa. Lag-virhe aiheutuu siitä, että magnetometrianurit tulevat etenemissuunnassa jonkin matkaa GPS-anturin perässä. Mittausajojen suunnasta riippuvaa heading-korjausta ei tarvittu, koska tulokset tulkittiin linja kerrallaan. Näin eri linjojen väliset tasoerot eivät häirinneet tulkintaa.

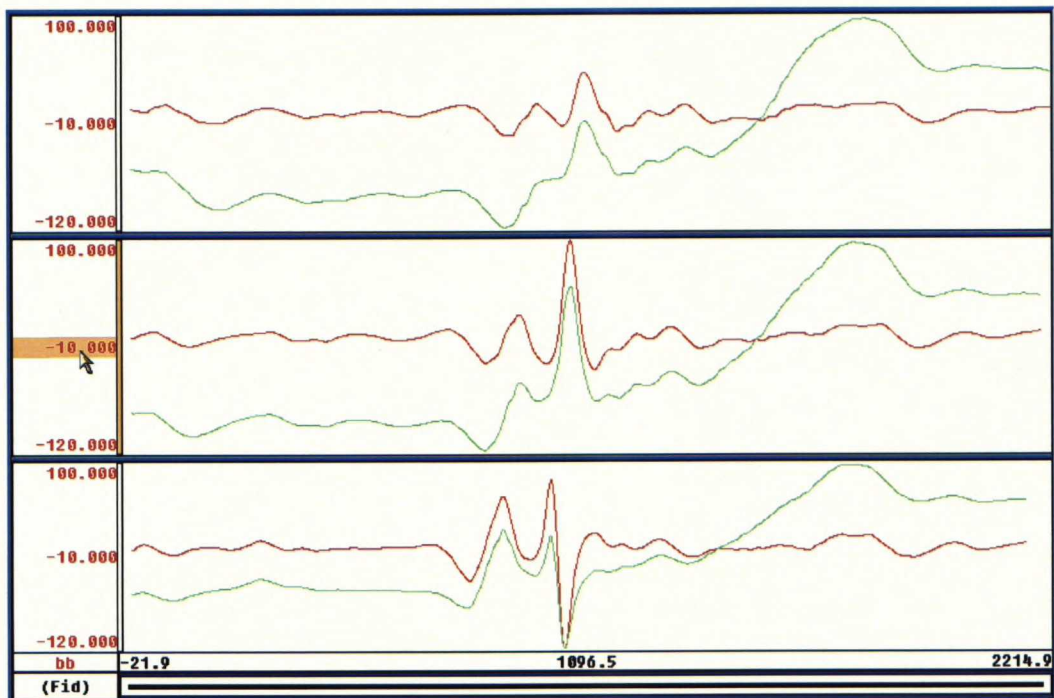
Magneettisten tulosten jatkokäsittelyssä aineisto suodatetaan matemaattisella kaistanpäästösuotimella. Tuloksista halutaan poistaa korkeataajuiset, lyhyen aallonpituuden kohinakomponentit sekä matalataajuiset, pitkäaaltoiset geologisen taustan aiheuttamat komponentit. Testimittausten perusteella kohina on aallonpituudeltaan alle kolmen metrin ja geologinen tausta taas yli 30 m. Jatkotulkintaan suodatetaan 3 – 30 m aallonpituusalueelle osuvat anomaliat. Valittu aallonpituusalue toimi melko hyvin tulkinnassa, sillä useimpien ammusten aiheuttamat anomaliat erottuivat kohtalaisesti ja anomalian amplitudi

ei oleellisesti muutu. 37 mm kranaatin anomalia ei käytetyillä mittaustäisyyksillä erotu kohinasta. Näin ollen aallonpituudeltaan alle kolmimetrisen 37 mm kranaatin anomalian suodattuminen pois mittaustuloksista ei ole olennaista.

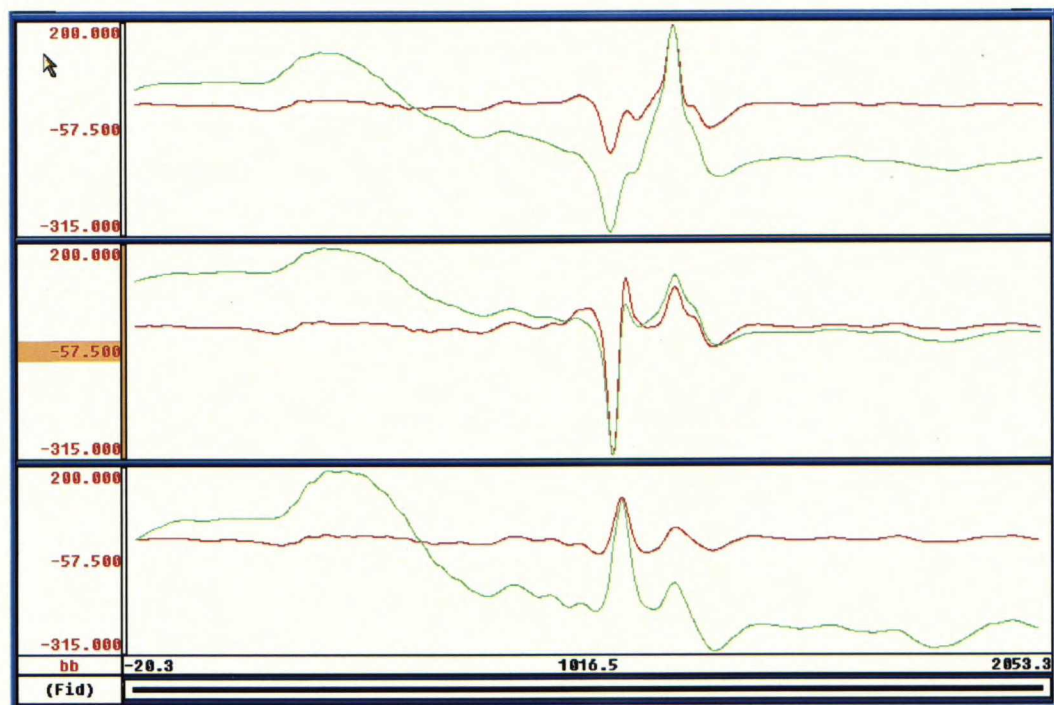
Magneettisten tulosten tulkinnassa päädyttiin visuaaliseen profiilitarkasteluun automaattisen *UX-Detect* -ohjelman sijasta. Merellä suoritetuissa mittauksissa ajolinjat menivät päällekkäin, mikä vaikeutti aineiston matemaattista käsittelyä. Tulkinnassa geofyysikko kävi läpi neljän rinnakkaisen magnetometrin profiilia samanaikaisesti. Jos jonkun anturin lähellä on ferromagneettinen kohde, poikkeaa lähimmän tai lähimpien anturien lukema kauempana olevien anturien lukemista. Vertaamalla vierekkäisiä profiileja toisiinsa tulkitsija havaitsee poikkeamat ja paikantaa näin ferromagneettisten kohteiden paikat profiililla (kuva 39 a, b ja c). Tulkintaohjelmassa on mahdollista verratata samanaikaisesti kolmea profiilia. Käytännössä pienimmät poimitut anomaliat olivat 2 – 3 nT luokkaa. Anomalioiden poiminta riippui myös hieman tulkitsijasta sekä tulkitsijan kokemuksesta.



a)



b)



c)

Kuva 39 a, b ja c. 3:n vierekkäisen magnetometrin profiilit, vihreä profiili on suodattamaton totaalikenttä, punainen profiili on matemaattisesti suodatettu (3 – 30 m kaistanpäästösuodatin).

Kun geofyysikko on käynyt profiilit visuaalisesti läpi ja merkinnyt havaitsemansa anomaliat, aineiston käsittely jatkuu *UX-Detect* -ammussovellusohjelmalla. *UX-Detect* -ohjelma laskee valituille kohteille magneettisen etäisyyden anturin ja kohteen välillä sekä kohteiden näennäisen massan. Ammussovellusohjelmassa täytyy valita, minkä tyyppistä kappaletta ollaan etsimässä, koska ohjelma laskee anomalian vaimenemisen etäisyyden funktiona eri tavalla erimuotoisille kappaleille (vrt. rakenneindeksi). Todellisuudessa ei tiedetä, minkä muotoisia kappaleita anomalian aiheuttajat ovat. Näiden aloitusparametrien valinta vaikuttaa olennaisesti ohjelman antamiin laskennallisiin arvoihin. *UX-Detect* -ohjelman antamia tuloksia ei tämän takia tule tuijottaa liian orjallisesti, vaan ottaa ne suuntaa antavana informaationa.

7.3 TULKINNAN ONGELMAT

7.3.1 ANOMALIAN VAIMENEMINEN ETÄISYYDEN FUNKTIONA

Ainoa luotettava ja vääristymätön informaatio on mitattu anomalia. Geosoft *UX-Detect* -ohjelmalla saadut kohteiden suhteelliset massat eivät anna todenmukaista kuvaa kohteiden koosta. Magneettisten tulosten tulkinnassa on tärkeää sekä anomalian suuruus että muoto. Magneettinen anomalia vaimenee erittäin nopeasti etäisyyden funktiona, minkä vuoksi tulkinnassa tulisi huomioida myös kaikuluotaimella saatu informaatio anturin ja kohteiden välisestä etäisyydestä. Mittausanturin ja pohjan välisen etäisyyden vaihdellessa samankokoisista kohteista rekisteröidään eri suuruisia anomalioita. Myös eri kerroksiin mudan sisään hautautuneet kohteet aiheuttavat erikokoisia anomalioita anturin ja kohteen välisen etäisyyden vaihdellessa. Väliaineilla eli merivedellä ja pohjasedimenteillä ei ole merkitystä magneettisen anomalian vaimenemisen kannalta.

Ammusten todennäköinen maksimihautautumissyvyys selvitettiin T/A Kaidan 28 kHz:n tutkimuskaikuluotaimen avulla. Geologi kävi läpi alueen kaikuluotausaineiston ja antoi arvion pohjan pintakerroksen laadusta sekä

syvyydestä, johon kranaatit voivat upota. Tämän mahdollisimman todenmukaisen etäisyyden avulla havainnot normeerattiin samalle kahden metrin etäisyydelle ja näin voitiin paremmin verrata anomalioita toisiinsa. Tällä tavoin ei voida huomioida anomalian muotoa vain ainoastaan sen suuruus nanotesloina. Tämä on karkea lähestymistapa erittäin monimutkaiseen ongelmaan. Lähtökohtana on, että geofyysikko on jo tehnyt tulkinnan profiileista ja valinnut todennäköiset kohteet anomalian muodon perusteella visuaalisena poimintana. Normeeraamalla nämä havaitut anomalia-arvot 2 m etäisyydellä havaituiksi arvoiksi, saadaan luotettavampi kuva kohteiden todellisista suuruusluokista. Samalla vältetään kauempaa havaitun suuremman kranaatin tulkitseminen pieneksi käsikranaatiksi, joka ruopattaisiin miehitetyllä ruoppaajalla.

Paras ratkaisu tulkintaongelmaan olisi se, että reaaliaikaisesti kaikuluotaimella mitattu etäisyys anturien ja pohjan välillä voitaisiin sisällyttää mukaan jo tulkintavaiheessa, kun myös anomalian muototieto on käytössä. Tämä edellyttää, että kohteiden uppoamissyvyys kyseiseen pohjanlaatuun on ensin arvioitu, jolloin kaikuluotaimen lukemaa voidaan korjata tarvittaessa.

7.3.2 UUSINTAMITTAUKSET

Myös magneettisten uusintamittausten yhteydessä ilmeni ongelmia. Kertaalleen mitattu ja ruopattu alue mitattiin uudelleen ja havaittiin uusia kohteita eri paikoissa sekä myös eri määriä kuin aikaisemmalla kerralla. Tämä tietenkin herätti epäilyjä koko magneettimittausta kohtaan. Selitys voi löytyä siitä, että kun osa meren pohjasta on poistettu, niin etäisyys alempana oleviin kohteisiin pienenee ja tästä johtuen ne havaitaan uusintamittausten yhteydessä suurempina anomalioina, kohteet siis tulevat paremmin esille. Ruoppauksessa ei voida aina olla varmoja, että kaikki kohteet on saatu poistettua. Osa voi pudota ruoppaajan kauhasta tai siirtyä uuteen paikkaan ja aiheuttaa "uusia" anomalioita uusintakierroksella.

7.3.3 KALLIOPERÄN VAIKUTUS

Kallioperän läheisyyden vaikutus magneettimittauksissa oli selkeä. Kalliopaljastumilla kentän arvojen vaihtelut olivat muita alueita suurempia, ilmeisesti anturin ja kallion välisen etäisyyden pienenemisen vuoksi. Mudan peittämällä alueella etäisyys anturien ja kallioperän välillä oli luonnollisesti huomattavasti suurempi. Joillakin kalliopaljastumilla havaittiin kuitenkin huomattavia anomaliapiikkejä, joten ilmeisesti kallion päälle oli joutunut metallisia kohteita. Joitain kallioalueita oli myös louhittu aiemmin ja siellä oli sukeltajan kertomuksen mukaan jäänteitä räjähdyspanoksista ja sytytyslangoista. Räjähdyslangat tuskin selittävät havaittuja suuria anomaliaita. Pohjasta noudettu kiillegneissiksi tunnistettu kivinäyte ei osoittautunut magneettiseksi maa-aseman magnetometrillä mitattaessa.

7.3.4 KOHTEIDEN POIMINTA PROFIILEILTA

Kun kohde on suoraan magnetometrin alla, havaitaan voimakas anomalia. Ongelmatapaus tulee esiin silloin, kun profiililla havaitaan pieni anomalia. Herää epäily, onko kyseessä pieni kohde magnetometrin alla vai suurempi kohde sivulla, jolloin etäisyyttä olisi hieman enemmän ja näin havaittu anomalia pienempi. Mikäli kohde jää reunimmaisen magnetometrin sivuun ei muissa antureissa välttämättä näy mitään. Tällöin on luonnollinen tulkinta, että reunimmaisen anturin luona on pieni kohde. Kun vierekkäisiä profiileja ei tulkita yhtäaikaan vaan profiili kerrallaan, poimitaan ylimääräisiä kohteita juuri tällaisten tapausten myötä. Tarkasteltaessa vierekkäisiä linjoja yhdessä voidaan paremmin huomata kauempaa havaittujen pienten anomalioiden sekä vierekkäisten linjojen suurten anomalioiden välinen mahdollinen yhteys. Käytännössä tehtiin niin, että kun alue oli tulkittu, tulostettiin kartalle kaikki havaitut kohteet. Päällekkäisistä ja aivan lähekkäisistä kohteista poistettiin pienimmät havainnot, jolloin ainakin osa useaan kertaan havaituista kohteista saatiin eliminoidua.

Geosoftin *UX-Detect* -ohjelmalla lasketaan kolmiulotteinen pinta profiilien kautta ja näin saadaan matemaattisesti helposti paikannettua pinnan

huippukohdat. *UX-Detect* -ohjelma ei kuitenkaan toiminut käytännössä aivan niin hyvin kuin alussa odotettiin. Perusongelma aiheutui mittauslinjojen päällekkäisyydestä (kuva 33). Meriolosuhteissa on erittäin vaikeaa ajaa alusta viiden metrin linjavälein, siten että saavutetaan täydellinen peitto ajolinjojen leikkaamatta toisiaan. Kun mittauslinjat menevät päällekkäin, havaitut anomaliat tasoittavat interpoloitua dataa ja jopa 500 kg lentopommin 70 nT anomalia voi pahimmassa tapauksessa jäädä huomaamatta. Maan päällä mittaukset voidaan suorittaa järjestelmällisemmin ja *UX-Detect* -ohjelmasta saadaan suurempi hyöty irti.

7.4 MITTAUSTULOKSET

7.4.1 152 MM KRANAATTI

Ennen varsinaisten mittauksen aloittamista tehtiin 152 mm kranaatin testimittaus magneettisesti rauhallisella alueella varsinaisen tutkimusalueen ulkopuolella. Testimittauksella pyrittiin saamaan tietoa 152 mm kranaatin anomaliasta eri asennoissa mahdollisimman autenttisissa oloissa sekä samalla selvittämään merimittauksen yhteydessä esiintyvää aallokosta ym. aiheutuvaa taustakohinaa.

Sukeltaja vei kranaatin pohjaan 15 m syvyyteen. Aluksen ajolinja kulki kranaatin yli lounas-koillinen -suunnassa. Kranaatin anomalia mitattiin ensin pystyasennossa ja sitten vaaka-asennossa luode-kaakkois -suunnassa. Etäisyys magnetometriantureista pohjaan oli noin kolme metriä anturisiipeen asennetun korkeataajuisen kaikuluotaimen mukaan.

Mitatut pysty- ja vaaka-asentoisen 152 mm kranaatin anomaliat näkyvät kuvissa 40 a ja b. Magnetometridatalle on tehty lag-korjaukset sekä kaistanpäästäsuodatus ($\lambda \in [3 \text{ m}, 30 \text{ m}]$). Pystyasentoisen 152 mm kranaatin anomalia on 20 nT ja vaaka-asentoisen 14 nT.

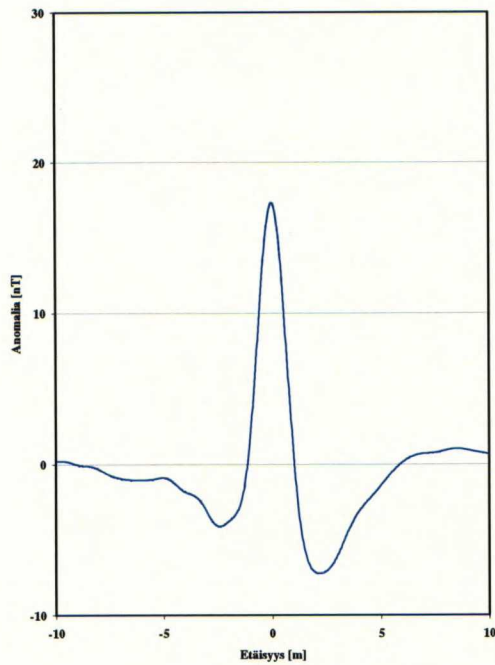
Maan päällä ja meressä mitattujen 152 mm kranaatin anomalioiden erot johtuvat lähinnä havaintoetäisyyksien vaihtelusta. Maan päällä 152 mm kranaatin

pystyanomalia on luokkaa 60 nT anturin ollessa kolmen metrin korkeudella (kuva 25 a). Merenpohjassa kaikuluotaimen mukaan kolmen metrin etäisyydellä mitattu anomalia on 20 nT (kuva 40 a). Todellisuudessa mittausetäisyys on maan päällä ollut hieman pienempi (2,65 m, ks luku 4.3). Kun 40 kg painava kranaatti asetetaan pystyasennossa pehmeiden pohjasedimenttien päälle, se vajoaa jonkin verran sedimenttien sisään. Magnetometrian turien yhteydessä olevan korkeataajuisen kaikuluotaimen signaali heijastuu takaisin jo pehmeistä pohjasedimenteistä, joihin painava kranaatti taas uppoaa. Näin ollen todellinen etäisyys anturien ja kranaatin välillä on ollut suurempi kuin kaikuluotaimen ilmoittama etäisyys.

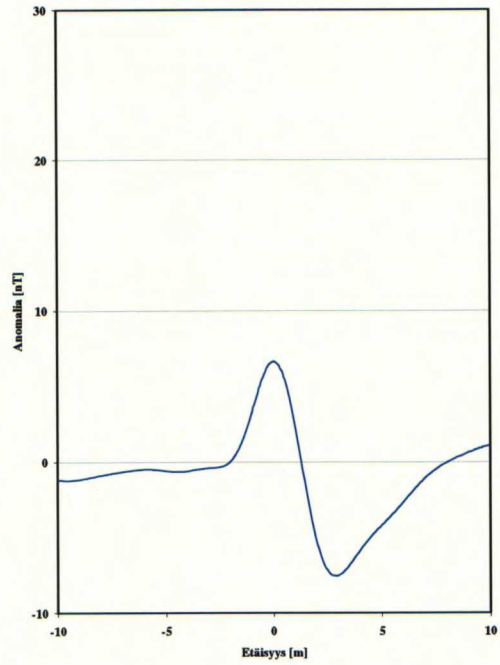
Normeeraamalla maalla 2,65 m etäisyydellä mitattu 60 nT anomalia vastaamaan kolmen metrin etäisyydellä mitattua arvoa saadaan kaavan 12 mukaan tulokseksi noin 40 nT. Edellisten perusteella voidaan kaavalla 12 edelleen määritellä meren pohjassa pystyssä mitatun 152 mm kranaatin havaintoetäisyys, kun havaittu anomalia on 20 nT. Magnetometrian turien ja 152 mm kranaatin väliseksi etäisyydeksi saadaan näin 3,8 m, mikä on käytännössä hyvin mahdollista.

Maan päällä mitatun vaaka-asentoisen 152 mm kranaatin anomalia on luokkaa 10 nT kolmen metrin etäisyydellä, kuva 25 b. Meren pohjassa mitattu anomalia kolmen metrin etäisyydellä on noin 15 nT, kuva 40 b. Maalla ja meressä mitattujen vaaka-anomalioiden suuruudet vastaavat hyvin toisiaan.

Meren pohjasta löydetty vanha 152 mm kranaatti näkyy kuvassa 41. Kuvassa 42 on esitetty Geosoft *Oasis Montaj* -tulkintaohjelmalla tehty magneettinen totaalianomaliakartta testimittauksessa merenpohjaan viedystä pysty- sekä vaaka-asentoisesta 152 mm kranaatista.



a)

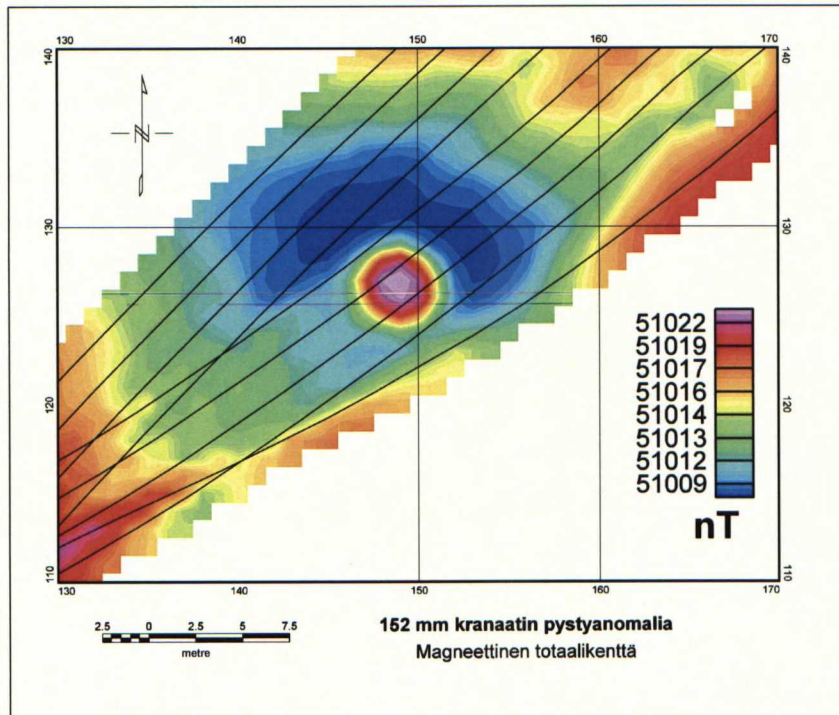


b)

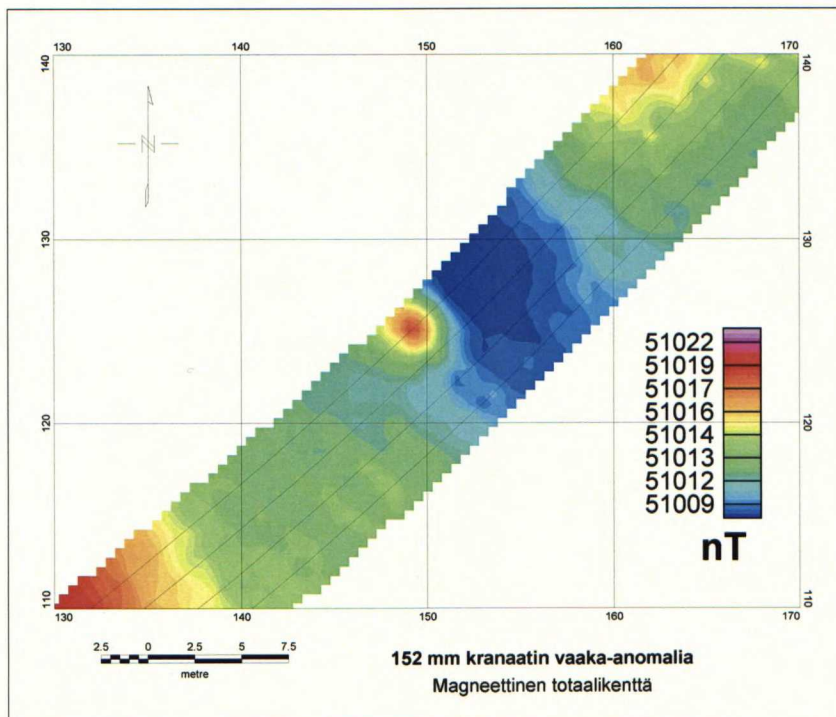
Kuva 40. a) Pystyasentoisen 152 mm kranaatin mitattu anomalia noin 3 m etäisyydellä, b) Vaaka-asentoisen 152 mm kranaatin mitattu anomalia noin 3 m etäisyydellä.



Kuva 41. Leväkasvuston peittämä 152 mm kranaatti (kuva ltn Lahtinen, Saaristomeren Meripuolustusalue, 1997).



a)



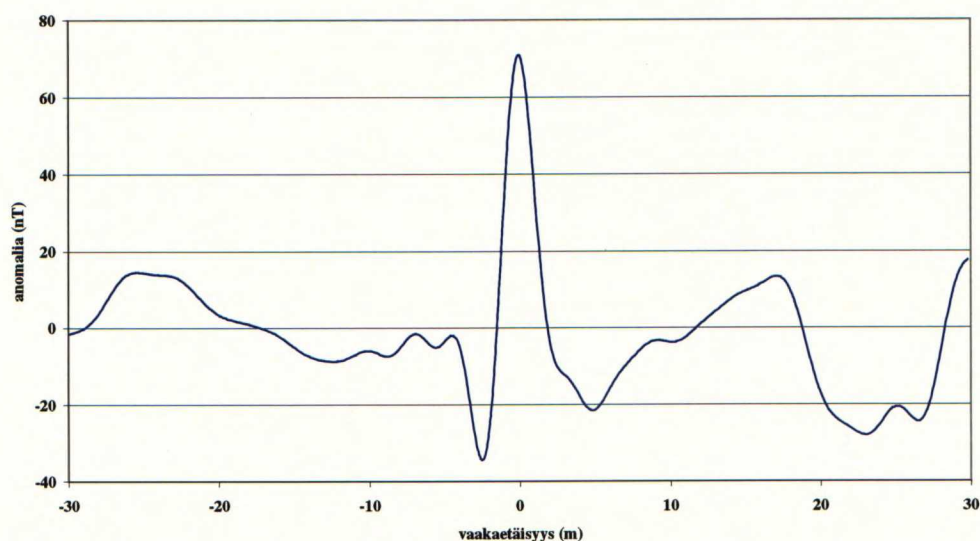
b)

Kuva 42. Merenpohjassa a) pystyssä ja b) vaaka-asennossa olevan 152 mm kranaatin mitattu anomalia, magneettinen totaaliarvokartta.

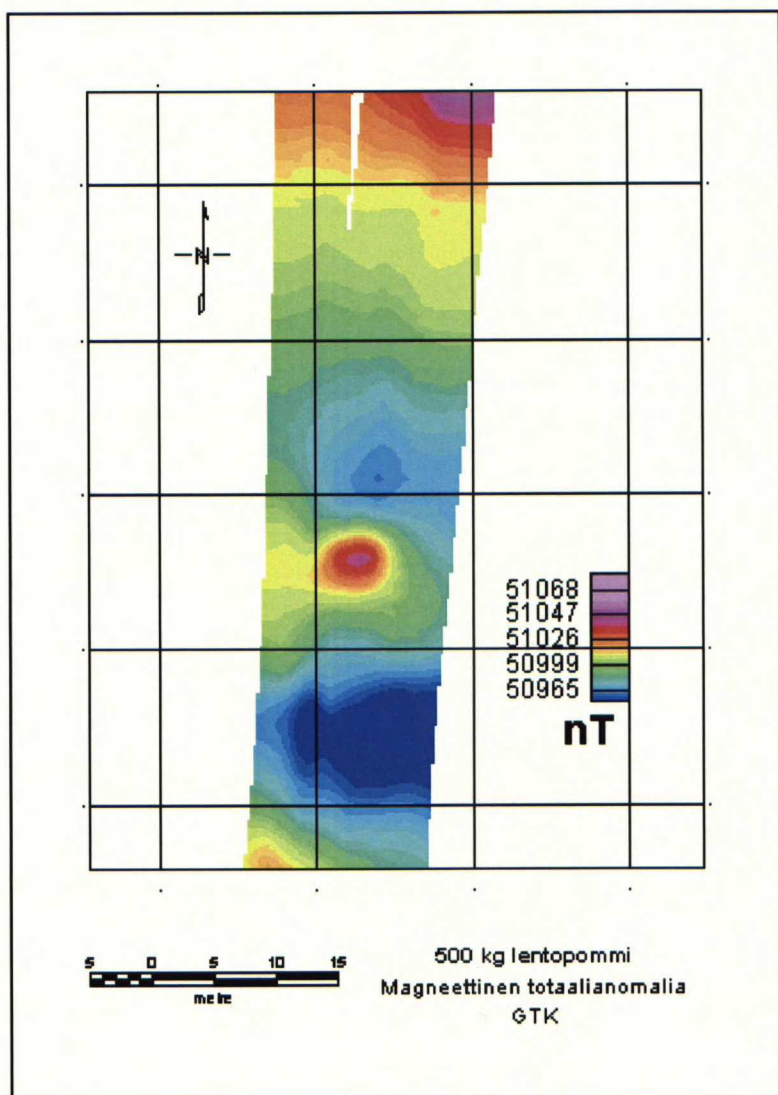
7.4.2 500 KG LENTOPOMMI

Kokkolan edustalta on paikallistettu kaksi sodan jälkeen upotettua 500 kg lentopommeja. Lentopommit eivät sijaitse varsinaisella tutkimusalueella. GTK mittasi lentopommien aiheuttamat magneettiset anomaliat saadakseen referenssiaineistoa. Sukeltajien mukaan pommit makaavat kovalla pohjalla vaaka-asennossa. Alueella on pommien lähellä suuria siirtolohkareita, joten anturia ei voitu laskea kolmea metriä lähemmäs pohjaa. 3,5 m mittausetäisyydellä pommeista saatiin 80 nT anomalia (kuva 43). Vaaka-asentoisen 500 kg lentopommin laskennallinen anomalia kolmen metrin etäisyydellä on 94 nT, mikä on samaa suuruusluokkaa kuin meriolosuhteissa mitattu anomalia.

Geosoft *Oasis Montaj* -tulkintaohjelmalla tehty magneettinen totaalianomaliakartta yhdestä vanhasta mereen upotetusta 500 kg lentopommista on esitetty kuvassa 44. Kokkolassa meren pohjasta löydetyt lieriö- ja kartioperäiset 500 kg lentopommit näkyvät kuvissa 45 ja 46.



Kuva 43. Mereen upotetun 500 kg lentopommin 3,5 m etäisyydeltä mitattu anomalia.



Kuva 44. Merenpohjassa olevan 500 kg lentopommin mitattu anomalia, magneettinen totaaliarvokartta.



Kuva 45. Kokkolan edustalle upotettu lieriöperäinen 500 kg lentopommi. (kuva ltn Lahtinen, Saaristomeren Meripuolustusalue, 1997)



Kuva 46. Kokkolan edustalle upotettu kartioperäinen 500 kg lentopommi. (kuva ltn Lahtinen, Saaristomeren Meripuolustusalue, 1997)

8. JATKOTUTKIMUSEHDOTUKSET

Kokkolan syväväylälle upotettujen vanhojen ammustarvikkeiden paikannus magneettisilla menetelmillä oli ensimmäinen suomalaisin voimin toteutettu ammustenpaikannustutkimus. Työ aloitettiin mittaussysteemin prototyypillä. Suunnittelussa oli vaikeaa huomioida etukäteen kaikkia esiin tulevia asioita ja ongelmia.

Tutkimusaluksen perässä vedettävää mittaussysteemiä on vaikea saada kulkemaan suoraan. Jatkosuunnitelmissa on kehittää Merenkulkupiirin alumiinilautasta itsenäinen mittaussyksikkö, joka liikkuisi kahden perämoottorin voimin. Tällöin alushenkilöstön tarve vähenee olennaisesti sekä navigointi helpottuu. GTK:n pientä lautta ja siipisysteemiä käytetään kuljetettavana versiona, jolla mitataan suojaisemmissa olosuhteissa.

Jatkossa mitataan edelleen Maan magneettikentän totaaliarvoa. Magnetometrian turien määrän lisääminen on tällä hetkellä taloudellisesti mahdotonta. Teoriassa paras mittaustulos saavutettaisiin varmasti asentamalla neljä cesiumhöyrymagnetometria vierekkäin kahteen kerrokseen. Näin mitattaisiin totaalikenttää kahdella eri etäisyydellä ja tuloksista voitaisiin laskea anturien välinen gradientti. Totaalikentän informaatio olisi silti tallella mahdollista myöhemmin tehtävää tarkempaa tutkimusta varten.

Magneettisen ja sähkömagneettisen mittausmenetelmän yhdistelmällä saataisiin ehdottomasti luotettavin mittaustulos. Magneettisilla mittauksilla saadaan indikaatio kaikista ferromagneettisista kappaleista. Sähkömagneettisilla menetelmillä voidaan havaita sekä ferromagneettiset että ei-ferromagneettiset johtavat kappaleet. Sähkömagneettisia mittauksia voidaan tehdä myös alueilla,

joiden läheisyydessä sijaitsee etsittävien kohteiden lisäksi suuria ferromagneettisia häiriötekijöitä. Näiden häiriötekijöiden vaikutus voidaan kompensoida pois mittaustuloksista.

Havaittu anomalia on ainoa luotettava ja vääristymätön informaatio ferromagneettisesta kohteesta. Magneettisen aineiston tulkinnassa on tärkeää sekä anomalian suuruus että muoto. Dipolin magneettinen anomalia vaimenee etäisyyden funktiona $1/r^3$. Havaintoetäisyys on erittäin kriittinen parametri ammusten löytymisen kannalta. Anturien ja kohteen välisen etäisyyden kaksinkertaistuksessa havaitava anomalia pienenee kahdeksasosaan. Jos magnetometrian turi on liian kaukana kohteesta, anomalian havaitseminen on mahdotonta.

Tulkinnassa tulisi huomioida myös kaikuluotaimella saatu informaatio anturin ja kohteiden välisestä etäisyydestä. Mittausanturin ja pohjan välisen etäisyyden vaihdellessa samankokoisista kohteista rekisteröidään eri suuruisia anomalioita. Paras ratkaisu ongelmaan olisi se, että reaaliaikaisesti kaikuluotaimella mitattu etäisyys anturien ja pohjan välillä voitaisiin sisällyttää mukaan jo tulkintavaiheessa, kun on käytössä myös anomalian muototieto. Tämä edellyttää, että on ensin arvioitu kohteiden uppoamissyvyys kyseiseen pohjanlaatuun ja näin kaikuluotaimen lukemaa olisi korjattu tarvittaessa.

Etsittävien kohteiden anomalioiden tuntemus on olennaista onnistuneen tulkinnan kannalta. Kokkolan magneettimittausten yhteydessä ammusten anomalioiden perusteelliseen mittaamiseen ei ollut riittävästi aikaa. Talven 2000 aikana GTK on mitannut eri kokoisten ammusten anomalioita Merivoimien yksikkömittaradalla. Todellisen magneettisen mittausdatan onnistunut tulkinta perustuu ammusten anomalioiden käyttäytymisen sekä siihen eri oloissa vaikuttavien tekijöiden syvälliseen perehtymiseen. Tämä vaatii ammusten anomalioiden matemaattista mallintamista ja tarkoin suunniteltuja käytännön mittauksia.

9. YHTEENVETO

Geologian tutkimuskeskus kartoitti magneettisilla mittausmenetelmillä kesän ja syksyn 1999 aikana 100 hehtaarin suuruisen alueen Kokkolan syväväylällä. Aikaa tutkimuksiin kului kolme ja puoli kuukautta. Tämä oli ensimmäinen suomalaisin voimin toteutettu ammusten magneettinen paikannustutkimus. Suuri magneettisten havaintojen määrä tutkimusalueella herätti paljon keskustelua. Magneettisilla menetelmillä ei havaintoja voida erotella todellisiin ammuksiin ja vaarattomiin ferromagneettisiin kohteisiin.

Magneettinen anomalia vaimenee erittäin voimakkaasti etäisyyden funktiona. Kun havaintoetäisyys kaksinkertaisuus havaittava anomalia pienenee kahdeksasosaan. Kranaateilla on eri suuruisia pysyviä magnetoitumia. Pysyvä magnetoituma voi pahimmassa tapauksessa kumota indusoituneen magnetoituman täysin, jolloin ammusta ei voida magnetometrillä havaita.

Tarkastelluista ammuksista 37 mm kranaatin asennon vaikutus on kaikkein kriittisin. On epätodennäköistä, että pystyasennossakaan olevaa yksittäistä 37 mm kranaattia havaitaan magneettisilla mittauksilla edes metrin etäisyydeltä. Vaaka-asennossa 37 mm kranaattia on mahdoton havaita metrin etäisyydeltä. Suuremmilla etäisyyksillä yksittäinen 37 mm kranaatti jää havaitsematta. Kun havaintoetäisyys ylittää kolme metriä, yksittäisen vaaka-asentoisen 152 mm kranaatin löytyminen on epätodennäköistä. Yksittäisen pystyasentoisen 152 mm kranaatin havaitseminen on mahdollista vielä kolmen metrin etäisyydeltä. Lentopommin (500 kg) havaitseminen käytetyillä mittausetäisyyksillä ei tuota ongelmaa.

Ammusten magneettinen anomalia on erittäin monimutkainen ilmiö, joka riippuu havaintoetäisyydestä ja ammuksen magneettisista ominaisuuksista sekä asennosta Maan magneettikenttään nähden. Magneettisillä mittauksilla ei voida saada 100 % varmuutta ettei tutkitulla alueella ole ferromagneettisia kohteita. Tämän vuoksi magneettisten mittausten yhteydessä on tärkeää tiedostaa menetelmän rajoitteet ja hyväksyä tietty virhemarginaali.

LÄHDELUETTELO

- Aromaa, J. 1995. Katodisen suojauksen potentiaali- ja virranjakaumat. Teknillisen korkeakoulun opetusjulkaisu. TKK-V-KORR-18. 65 s.
- Barrow, B., Khadr, N., DiMarco, R., Nelson H. H. 1996. The Combined Use of Magnetic and Electromagnetic Sensors for Detection and Characterization of UXO. Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems, EEGS, Colorado
- Bell, T. 1997. Buried UXO Detection, Location and Discrimination, Material for Defense Science Board Review. AETC Incorporated, Arlington. 19 p.
- Blakely, R. J. et Simpson, R. W. 1986. Approximating Edges of Source Bodies from Magnetic or Gravity Anomalies. Geophysics, vol. 51. No 7, p. 1494-1498.
- Breiner, S. 1973. Applications Manual for Portable Magnetometers. GeoMetrics, Sunnyvale, California, USA. 58 p.
- DeProspero, D., Cleary, E., Bell, T. 1996. Marine Magnetic Survey Analysis and Interpretation. Arete Engineering Technologies, Virginia. 14 p.
- Eskola, L., Puranen, R., Soininen, H. 1999. Measurement of Magnetic Properties of Steel Sheets. Geophysical prospecting, vol 45, p. 1-10.
- Frumkis, L. et Kaplan, B. Z. 1999. Spherical and Spheroidal Shells as Models in Magnetic Detection. IEEE Transactions on Magnetics, vol 35, NO 5. September. P. 4151 - 4158.

Geometrics. 1997. G880 Cesium Marine Magnetometer Operation Manual. San Jose, California. 60 p.

Holma, P. 1999. Teknkaptl, Vaasan Sotilasläänin Esikunta, Wolfintie 35, 65100 Vaasa, haastattelu 30.9.1999.

Hänninen, P., Hänninen, P., Koponen, L., Koskiahde, A., Maijala, P., Pollari, R., Saarenkoto, T., Sutinen, R. 1991. Maatutkaluotaus. Suomen geoteknillinen yhdistys ry. Rakentajain kustannus oy. Tampere. 68 s.

Jones, E. J. W. 1999. Marine Geophysics. England. John Wiley & Sons Ltd. 466 p.

Laitila, J. 1999. Teknkapt, Ilmasotakoulu, Lentokentäntie, 62200 Kauhava, haastattelu 25.11.1999.

MAOL-tilukko. 1989. Matematiikka, Fysiikka, Kemia tilukot. Matemaattisten Aineiden Opettajien Liitto MAOL ry. Keuruu. 144 s.

Maunula, H. 1999. Komkapt, Vaasan Sotilasläänin Esikunta, Wolfintie 35, 65100 Vaasa, haastattelu 3.9.1999.

McDonald, J.R. et Robertson R. 1996 Magnetic Sensor Field Tests and Evaluations for Towed-Array Systems. Naval Research Laboratory, Fort Devens, MA. 84 p.

Nevanlinna, H., Pesonen, L., Blomster, K. 1983. Earth's Magnetic Field Charts (IGRF 1980.0) Report Q 19/22.0 world/1983/1. Geological Survey of Finland, Geophysics Department, Espoo. 5p.

Osborn, J.A. 1945. Demagnetizing Factors of the General Ellipsoid. Physical Review, vol. 67, numbers 11 and 12, p. 351 – 357.

Panama report. 1997. Evaluation of Unexploded Ordnance Detection and Interrogation Technologies. Department of Defence. www.uxocoe.org/unexploded.html

Parasnis, D.S. 1997. Principles of Applied Geophysics. Fifth edition, Chapman and Hall, London. 429 p.

Peltoniemi, M. 1998. Aerogeofysikaaliset menetelmät. Teknillisen korkeakoulun opetusjulkaisu TKK-IGE-C-20. 269 s.

Peltoniemi, M. 1988. Maa- ja kallioperän geofysikaaliset tutkimusmenetelmät. Otakustantamo. 411 s.

Reid, A. B., Allsop, J. M., Granser, H., Millett, A. J., Somerton, I.W. 1990. Magnetic Interpretation in Three Dimensions Using Euler Deconvolution. Geophysics, vol 55, no 1. p. 80-91.

Robinson, E.S. et Çoruh, C. 1988. Basic Exploration Geophysics. John Wiley & Sons, Inc. 562 p.

Roest, W. R., Verhoef, J. Pilkington, M. 1992. Magnetic Interpretation Using the 3-D Analytic Signal. Geophysics, vol 57, no 1. p. 116-125.

Sihvola, A. et Lindell, I. 1996. Sähkömagneettinen kenttäteoria 2. Dynaamiset kentät, Otatieto Oy, 200 s.

Spurgeon, B., Racic, L., Wang, H., Musselman, C. 1998. Geosoft *UX-Detect*, UXO Target Analysis System for Magnetic, 1VD and EM-61 Data, Tutorial and User Guide. Toronto. Geosoft Inc. 49 p.

Sutinen, H. 1998. Tilanneraportti Valkeisenlammen lentopommien paikallistamisesta maatutkaluotausten tulkinnan jälkeen. Geologian tutkimuskeskus, Väli-Suomen aluetoimisto. 2 s.

Won, I. J. 1995. Resolving Power of Some Geophysical Methods as Applied to Detecting Buried Unexploded Ordnance. JEEG, v.0, no. 1 (July 1995), p. 25-29.

Yaghoobian, A., Boustead, G. A. Dobush, T. M. 1993. Object Delineatin Using Euler's Homogeneity Equation, Location and Depth Determination of Buried Ferro-Metallic Bodies. SAGEEP 1993, vol. 2. p. 613-632.